



## **Termisk forgasning af biomasse**

### **Sammenfatning af aktiviteter på DTU**

**Henriksen, Ulrik Birk**

*Publication date:*  
2005

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Henriksen, U. B. (2005). *Termisk forgasning af biomasse: Sammenfatning af aktiviteter på DTU*. Technical University of Denmark. MEK-ET-PhD-2004-01

---

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**NOVEMBER 2004**



**Danmarks  
Tekniske  
Universitet**

# **Termisk forgasning af biomasse**

**Sammenfatning af aktiviteter på  
DTU.**

**Ulrik Henriksen**

**Institut for  
Mekanik,  
Energi og  
Konstruktion**

**MEK**

**Energiteknik**



**Forord**

Denne Ph.D. afhandling er gennemført på baggrund af mange års forskning. Jeg vil derfor gerne på dette sted takke nuværende og tidligere ansatte og studerende, der har bidraget til arbejdet i Biomasseforgasningsgruppen.

Samtidig rettes en tak for økonomisk støtte fra forskellige kilder hvoraf de væsentligste har været Elkraft, EFP, UVE og PSO.

Jeg vil også gerne takke mine vejledere Niels Houbak og Bjørn Qvale for vejledning og diskussioner gennem mange år.

Erik Kofoed, der startede hele forgasningsområdet på DTU skal dog have en speciel tak.

Arbejdet er udført på Danmarks Tekniske Universitet (DTU) af Ulrik Henriksen

Vejledere:

Professor ved DTU Bjørn Qvale (hovedvejleder)

Lektor ved DTU Niels Houbak

Dato:

Ulrik Henriksen



## **1. Indholdsfortegnelse**

	side
Forord.....	1
1. Indholdsfortegnelse.....	2
2. Resume.....	4
2.1 Resume på dansk.....	4
2.2 Resume på engelsk (Abstract).....	5
3. Opbygning af afhandling.....	7
3.1 Gennemgang af bilag.....	8
4. Formål.....	12
5. Baggrund.....	13
5.1 Biomasse.....	13
5.2 Biomasseforgasningsgruppens historie.....	14
6. Fremgangsmåde.....	17
6.1 Forskning fører til teknologi eller er det omvendt?.....	17
7. Forgasning sigtende på decentral kraftvarme.....	21
7.1 Kort oversigt over termisk forgasning .....	21
7.2 Indledende eksperimenter med pyrolyse og forgasning af Halm.....	23
7.3 Eksternt opvarmet kontinuert forgasning.....	24
7.4 Internt opvarmet kontinuert forgasning (totrinsforgasseren).....	26
7.5 50 kW forgasseren.....	28
7.6 450 kW anlægget i Blære.....	32
7.6.1 Styring.....	33
7.6.2 Resultater.....	34
7.7 100 kW forgasseren.....	35
7.7.1 Resultater.....	36
7.8 Optimering af 100 kW forgasseren.....	40
7.8.1 Modifikationer.....	40
7.8.2 Resultater.....	42
7.9 Halmforgasning igen.....	45
7.10 Viking forgasseren.....	48
7.10.1 Anlægsbeskrivelse.....	49
7.10.2 Styring.....	50
7.10.3 Resultater.....	50
7.11 Hvirvelstrømsforgasseren.....	51
7.12 Fluidbedteknologi til totrinsforgasning.....	53
8. Generelle emner.....	56
8.1 Masse- og energibalance ved pyrolyse .....	56
8.2 Varmetransport i biomasse og biomassekoks.....	59
8.3 Tjæredekomponering.....	61

8.4	Forgasning af koks.....	64
8.4.1	Mikro-TGA undersøgelser.....	64
8.4.2	Makro-TGA undersøgelser.....	65
8.4.3	Uorganiske stoffers indflydelse på reaktiviteten.....	67
8.5	Strømning af gas gennem en koksbed.....	67
8.5.1	Tryktab.....	68
8.5.2	Strømning.....	69
8.6	Askeundersøgelser.....	71
8.7	Partikler i gassen.....	72
8.8	Systematisering.....	73
8.9	Miljøeffekter og vaskevandsrensning.....	73
8.10	Modellering.....	74
8.10.1	Systemmodeller.....	74
8.10.2	Komponentmodeller.....	76
8.11	Relationer mellem grundlæggende undersøgelser, modellering og forgasserudviklingen.....	76
9.	Oversigt over øvrige aktiviteter.....	78
9.1	Motorundersøgelser.....	78
9.1.1	Forsøgshistorie.....	79
9.1.2	Belægninger.....	80
9.1.3	Back-firing.....	82
9.1.4	Bankning.....	84
9.1.5	Ydelse og virkningsgrad.....	85
9.1.6	Emissioner.....	90
9.1.7	Styring og regulering.....	91
9.1.8	Reguleringsmæssig sammenkobling mellem motor- generatoranlæg og gasforsyningsanlæg.....	94
9.1.9	Afledte aktiviteter.....	96
9.1.10	Andre studier.....	97
9.1.11	Indirekte fyrede gasturbiner.....	98
9.2	Tilsatsfyring til kraftværkskedler.....	99
9.2.1	Pyrolyse.....	99
9.2.2	Forgasning.....	100
10.	Ulrik Henriksens bidrag til det præsenterede arbejde.....	104
10.1	Nærværende sammenfatning.....	104
10.2	Gennemgang af bilag.....	104
10.3	Andre bemærkninger.....	106
11.	Sammenfatning og konklusion.....	108
12.	Visioner.....	110
	Liste over referencer.....	112
	Referencegruppe a.....	112
	Referencegruppe b.....	128
	Referencegruppe c.....	131
	Referencegruppe p.....	132
	Liste over bilag.....	133

## **2. Resume**

### **2.1 Resume på dansk**

Titlen på denne Ph.D. afhandling er: Termisk forgasning af biomasse. Sammenfatning af aktiviteter på DTU.

Afhandlingen giver en sammenfatning af aktiviteterne, under det der i dag hedder Biomasseforgasningsgruppen på DTU. Aktiviteterne omhandler termisk forgasning af biomasse.

Der er fokuseret på forgasning sigtende på decentral kraftvarme og på procesunderstøttende grundlæggende forskning. Herudover er der, for sammenhængens og fuldstændighedens skyld, givet en oversigt over de øvrige aktiviteter.

Gruppens aktiviteter startede sidst i firserne. I starten sigtedes der mod at indsamle og formidle viden inden for området. Det viste sig dog snart, at der på daværende tidspunkt ikke fandtes tilstrækkelig viden, og slet ikke tilgængelig teknologi til at forgasse den danske biomasse. Da man fra politisk side ønskede en sådan teknologi tilvejebragt, startedes forsknings- og udviklingsaktiviteterne.

I afhandlingen beskrives relationerne mellem de forskningsmæssige og de udviklingsmæssige aktiviteter som komplicerede og sammenflettede. Samtidig vurderes, at denne sammenfletning netop har givet grobund for et vellykket forløb, der har ført frem mod de ønskede teknologiske resultater.

Vedrørende ”forgasning sigtende på decentral kraftvarme” er tottrinsprocessen udviklet. Udviklingsforløbet rækker fra laboratorieopstillinger frem til en fuldautomatisk forgasser, der har kørt i over 2000 timer. Sammenlignet med de fleste andre forgasningsprocesser, har tottrinsprocessen de fordele, at den producerer en praktisk talt tjærefri gas og har høj energieffektivitet. Der arbejdes nu flere steder i verden med etablering af forgassere baseret på tottrinsprocessen.

Vedrørende ”generelle emner”(procesunderstøttende grundlæggende forskning) er der gennemført undersøgelser inden for en række områder. Dette drejer sig bl.a. om pyrolyse, forgasning af koks, matematisk modellering, additivtilsætning til forbedring af askeegenskaberne, gasrensning, varmetransport i koks, og tjæredekomponering. Det er herunder fastlagt, at tjæredekomponeringen i tottrinsforgasseren finder sted i to tempi. Dels i den partielle oxidation og dels ved gassens passage gennem koksbedden.

Vedrørende ”øvrige aktiviteter” er undersøgelser af forgasningsgas anvendt som motorbrændstof beskrevet, og det er vist, at gas fra tottrinsforgasseren er et velegnet motorbrændstof.

Udviklingen af forgasningsprocesser sigtende på tilsatsfyring i kraftværkskedler er beskrevet. Størst interesse er vist ”Lavtemperatur cirkulerende fluidbed” -processen (LT-CFB). Fordelen ved denne proces er, at den i stor udstrækning tilbageholder de uorganiske bestanddele fra biomassen, som er uønsket i kraftværkskedler, uden brug af kompliceret gasrensningsudstyr.

Der blev oprindeligt opstillet målsætninger om at finde frem til forgasningsprocesser, der én gang for alle løste de væsentligste problemer ved forgasning, nemlig tjære i gassen og askens belægningsmæssige og korrosive egenskaber. Det konkluderes, at dette er opnået.

Visionerne for de gennemførte aktiviteter er, at tottrinsprocessen bliver den mest udbredte forgasningsproces i verden, når det drejer sig om forgasningsanlæg til decentral kraft- og kraftvarmeproduktion. Videre er visionen at LT-CFB forgasseren vil blive udbredt til anvendelse ved forgasning af "vanskelige" biomasser primært sigtende på tilsatsfyring til kraftværkskedler.

## **2.2 Resume på engelsk (Abstract)**

The title of this Ph.D. thesis is: Thermal Gasification of Biomass. Compilation of activities in the "Biomass Gasification Group" at Technical University of Denmark (DTU).

This thesis gives a presentation of selected activities in the Biomass Gasification Group at DTU. The activities are related to thermal gasification of biomass. Focus is on gasification for decentralised cogeneration of heat and power, and on related research on fundamental processes. In order to insure continuity of the presentation the other activities in the group, have also been described.

The group was started in the late nineteen eighties. Originally, the main aim was to collect and transfer knowledge about gasification of straw. Very quickly it became clear, that knowledge was insufficient and the available technology, in most cases, unsuitable for converting the Danish biomass. The need for such technology was politically motivated, and therefore research and developing activities were initiated.

In this thesis the research activities and development activities have been described. The combination of these two types of activities is complex and difficult, but it is concluded, that the combination of these activities has been fruitful.

The two- stage gasifier was developed for gasification aiming at decentralised cogeneration of heat and power. The development ranged from lap-top scale equipment to a fully automatic plant with more than 2000 hours of operation. Compared to most other gasification processes, the two- stage process has the advantages that it is producing gas with practically no tar, and the energy efficiency is high. Work on plants based on the two-stage process, has been initiated in several locations worldwide.

A number of fundamental process-related subjects have been carried out. This have been related to etc. pyrolysis, char gasification, mathematical modelling, the use of additives to improve the characteristics of the ash, gas clean up, heat transfer in char and tar decomposition. It has been found that the tar decomposition in the two-stage process is carried out in two steps, in the partial oxidation process after the pyrolysis, and in the char bed.

The operation of the two-stage gasifier showed that gas from this process was an excellent engine fuel.

A spin-off process, the Low Temperature Circulating Fluid Bed Gasifier (LT-CFB) process is now the object of intense research and development. The advantages of that process is, that the main parts of the inorganic species from the biomass, which are undesirable in the power plant, is deposited in the ashes in the gasifier without the use of gas cleaning equipment.

Originally the purpose of the activities was to find gasification processes, which “once and for all”, solves the main problems related to gasification, namely tar in the gas and deposits and corrosion caused by the ashes. It is concluded, that this is fulfilled.

The perspective of the activities that have been completed up to now is that the two-stage process will find worldwide use for decentralised cogeneration plants and that the LT-CFB gasifier will find worldwide use for gasifying “difficult” biomasses.

### **3. Opbygning af afhandling**

Denne afhandling bygger på mange års arbejde, og en afgrænsning har været nødvendig.

Afhandlingen består af nærværende sammenfatning samt 11 bilag.

Det er valgt at give en sammenfatning af de aktiviteter der er foregået under Biomasseforgasningsgruppen fra sidst i firserne til og med 2003. Ulrik Henriksen har deltaget i eller ledet disse aktiviteter. Der refereres til over et hundrede publikationer fra gruppen, og Ulrik Henriksen er hovedforfatter eller medforfatter på langt de fleste (se i øvrigt afsnit 10).

Herudover er 11 af publikationerne udvalgt og vedlagt som bilag og er derfor en del af afhandlingen.

Hovedlinierne i afhandlingen er valgt at være, dels udviklingen af tottrinsforgasseren fra de første forsøg frem til Vikingforgasseren, og dels nogle hjørnестene i den grundlæggende forskning, der kan betragtes som procesunderstøttende forskning til udviklingsspor inden for forgasningsteknologi. Den grundlæggende forskning sigter ofte ikke på løsning af konkrete problemer, men på generel videnopbygning, dog inden for områder relevante til procesudviklingen.

De udvalgte 11 publikationer indgår i sammenfatningen, men hver enkelt sættes ind i sammenhængen i afsnittet ”Gennemgang af bilag”. Bilagene viser forskellige sider af Ulrik Henriksens arbejde.

Sammenfatningen af aktiviteterne under Biomasseforgasningsgruppen er opdelt i tre områder.

”Forgasning sigtende på decentral kraftvarme” dækker udvikling af tottrinsprocessen og tottrinsforgasseren. Hvirvelstrømsforgasseren betragtes i denne sammenhæng som en speciel tottrinsforgasser.

”Generelle emner ” dækker den grundlæggende forskning, der kan benævnes procesunderstøttende forskning. Da en række resultater herfra sigter mod anvendelse ved modellering, er modellering beskrevet under dette område.

”Oversigt over øvrige aktiviteter” omhandler først motorundersøgelser, idet disse ligger i naturlig forlængelse af forgasning til decentral kraftvarme, og har derfor fået relativt stor plads i sammenfatningen. Herefter gennemgås pyrolyse og forgasning sigtende på tilsatsfyring. Denne oversigt er medtaget for sammenhængens og fuldstændighedens skyld.

### **3.1 Gennemgang af bilag**

De udvalgte bilag gennemgås, og der henvises til, hvor i afhandlingen de indgår.

#### **Bilag 1:**

Pyrolyse og forgasning af halm. Delrapport 4.

Eksperimentel og beregningsmæssig undersøgelse af forhold ved pyrolyse og forgasning af halm.

Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Ole Christensen, Søren Gabriel, Thomas Koch.  
Department of Energy Engineering. DTU.

RE 91-3. 178 pages. 1991.

I denne rapport beskrives grundlæggende undersøgelser af masse- og energifordelingen ved pyrolyse af halm (se afsnit 8.1) Der gennemføres databehandling med statistisk usikkerhedsbestemmelse osv.

Rapporten omhandler endvidere eksperimentelt arbejde med opbygning af forsøgsopstillinger, der efterviser to forgasningsprocesser. Den ene er en eksternt opvarmet forgasser (se afsnit 7.3). Denne er en forløber for den anden, som er den første tottrinsforgasser på DTU (se afsnit 7.4). De første resultater herfra med høj energivirkningsgrad og lavt tjæreindhold er dokumenteret i denne rapport. Rapporten indeholder matematiske modeller, der ud fra kemisk ligevægt i gasfasen samt masse og energibalace, beskriver den eksternt opvarmede forgasser og tottrinsforgasseren. Modellerne verificeres ved sammenligning med de eksperimentelle resultater og anvendes til parameterstudier. Herved vises de gode energimæssige potentialer ved anvendelse af tottrinsforgasning.

#### **Bilag 2 :**

Mass and Energy Distribution of the Pyrolysis Products from Straw.

Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Ole Christensen.

Department of Energy Engineering. DTU.

In proceedings of the conference: "Advances in Thermochemical Biomass Conversion".

Interlaken, Switzerland. May 1992. Vol. 2. pp. 1110 – 1121.

Denne artikel præsenterer resultater af masse- og energi fordelingen ved pyrolyse af halm. Artiklen bygger på samme resultater som publiceret i bilag 1.

#### **Bilag 3**

50 kW-forgasseren.

Ulrik Henriksen, Ole Christensen.

Department of Energy Engineering. DTU.

RE 94-3. 137 pages. 1994.

Denne rapport beskriver opbygningen af en forsøgsopstilling med en tottrinsforgasser benævnt 50 kW forgasseren. Der præsenteres resultater fra forsøgskørsel. Det dokumenteres, at de positive resultater opnået med en lille laboratorium tottrinsforgasser (Se afsnit 7.4) kan genskabes med en opstilling, der er væsentlig større (Se afsnit 7.5). Der køres indledende forsøg med motordrift på den producerede gas, og problemet Back-firing opstår. Problemet løses ikke på dette tidspunkt, men først mange år senere (om back-firing se afsnit 9.1.3)

Teorier om, at back-firing kan undgås ved at reducere gassens indhold af brint bevirker, at der opbygges en beregningsmodel, der viser muligheder og begrænsninger, hvis der skal produceres en gas med lavt brintindhold.

## Bilag 4

Gasification of Straw in a Two-Stage 50 kW Gasifier.

Ulrik Henriksen, Ole Christensen.

Department of Energy Engineering. DTU.

In proceedings of the conference: "8th European Biomass Conference.

Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry".

Vienna, Austria. October 1994. Vol. 2. pp. 1568 – 1578.

Denne artikel sammenfatter væsentlige resultater fra den undersøgelse, der er rapporteret i bilag 3. (se afsnit 7.5).

## Bilag 5

Relationship between Gasification Reactivity of Straw Char and Water Soluble Compounds present in this Materials.

Ulrik Henriksen, Martin P. Jacobsen, Torben Lyngbech, Martin Wittrup Hansen.

Department of Energy Engineering. DTU.

In proceedings of the conference: "Developments in Thermochemical Biomass Conversion".

Banff, Canada. 20-24 May 1996. Vol. 2. pp. 881 – 891.

Denne artikel beskriver reaktivitetsforsøg. Reaktiviteten i halmkoks er meget afhængig af indholdet af uorganiske bestanddele. Det vises, at ved udvaskning falder reaktiviteten og at ved genindsætning af de vandopløselige udvaskede bestanddele genvindes den oprindelige reaktivitet. Opkoncentration af bestanddelene kan øge reaktiviteten betydeligt. (se afsnit 8.4.3)

## Bilag 6

Teoretiske betragtninger vedrørende termiske forhold i en makro TGA forsøgsreaktor.

Ulrik Henriksen.

Department of Energy Engineering. DTU.

ET-ES-98-05. 107 pages + 118 pages appendix. 1998.

Denne rapport præsenterer undersøgelser, der oprindeligt blev startet for at undersøge mulighederne i at anvende modeller af denne type til beskrivelse af forholdene i en forgassers koksreaktor.

Da detaljerede målinger af reaktivitet, omsætningsgrad osv. er ret vanskeligt i en egentlig forgasser, valgtes i denne undersøgelse at modellere en makro TGA reaktor. (se afsnit 8.4.2). Herved kunne mulighederne ved denne modelleringsmetode vurderes, også set i relation til egentlige forgassere.

Modellerne baserer sig på masse- og energibalace, lokal kemisk ligevægt i gasfasen, udtryk for varmetransporten samt udtryk for koksreaktiviteten.

Modellerne blev gradvist gjort mere og mere komplicerede idet flere og flere effekter blev medtaget i beregningerne. Modeller på forskellige niveauer er beskrevet.

Resultaterne af modelberegningerne sammenlignes med eksperimenterne og der ses gode overensstemmelser uden anvendelse af parametertilpasning.

Ved sammenligning med eksperimenterne dokumenteres, at modellerne kan forudsige kanaldannelse i koksbedden under forgasning i vanddampatmosfære.

Det rapporterede arbejde består af omfattende teoretisk modelleringsarbejde og af omfattende eksperimentelt arbejde. Denne rapport er en væsentlig del af afhandlingen.



## Bilag 7

Optimized Two-Stage Gasifier.

Jens Dall Bentzen. COWI consult. Lyngby.

Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul. Department of Energy Engineering. DTU.

Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.

In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".

Seville. Spain. June 2000.

Denne publikation viser, hvordan teoretisk viden vist i bilag 8 kan anvendes ved optimering af en forgasser. Problemet var, at der pludselig kunne konstateres betydelige tjærekoncentrationer i gassen fra tottrinsforgasseren. Ud fra den opbyggede viden om tjærenedbrydning i en tottrinsforgasser (Se bilag 8) blev det hurtigt indset, at problemet måtte skyldes by-pass af gas uden om koksbedden. Reaktoren blev rekonstrueret, og tjærekoncentrationen i den producerede gas blev atter lav som forventet. (se afsnit 7.8)

## Bilag 8

High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier.

Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.

Elfinn Larsen. Risø National Laboratory. Roskilde. Denmark.

Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.

Article in: "Energy and Fuels". Vol. 14, Issue 4. 2000. pp. 816-819.

Denne artikel er baseret på eksperimenter med den såkaldte 100 kW forgasser. Der er gennemført en undersøgelse, der såvel kvantitativt som kvalitativt forbedrer forståelsen af tjærenedbrydningen i forgasseren. Det vises, at der sker en væsentlig nedbrydning af tjærestoffer såvel i den partielle oxidation som ved gassens passage gennem koksbedden. (se afsnit 8.3)

## Bilag 9

Forenklete betragtninger vedrørende tryktab og koksstruktur i fixed-bed forgasningsreaktorer.

Ulrik Henriksen.

Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion, DTU.

MEK-ET-ES-2001-03. 33 pages. 2001.

Dette arbejde baseres på forenklete betragtninger vedrørende tryktabet ved passage af gas gennem en koksbed, samt ved hjælp af enkle matematiske modeller af koksomsætningen i en koksbed. Det vises, at partiklernes geometriske ændringer under nedbrydningen har afgørende betydning på tryktabet, samt at hovedparten af tryktabet findes hvor temperaturen er lavest og omsætningsgraden høj. Arbejdet betragtes som udgangspunkt for de gennemførte videre undersøgelser. (Se afsnit 8.5.1 og 8.5.2).

## Bilag 10

Heat Transfer in a Fixed Bed of Straw Char

Jan Fjellerup, Ulrik Henriksen, Anker Degn Jensen, Peter Arendt Jensen and Peter Glarborg

Article in: [Energy & Fuels](#). Vol. 17, Issue 5, 2003. pp. 1251-1258

Ved sammenligning med eksperimenter vises at varmetransport i halmkoks kan udregnes teoretisk på basis af en metode foreslået af Yagi og Kunii, der beskriver varmetransport i en bed af partikler. Metoden udvides med en model, der sammenkæder den karakteristiske afstand mellem partikler med bedporøsiteten. Herved haves en model, der kan beregne varmetransport i halmlignende materiale, når porøsiteten og en karakteristisk strådiameteren er kendt.

Dette arbejde er baseret på tidligere undersøgelser, der sigtede på modellering af forgasningsreaktorer, men den her beskrevne udvidelse gør modellen langt mere anvendelig bl.a. ved modellering af ristefyringsanlæg. (se afsnit 8.2)

## Bilag 11

The Design and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifier

Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Benny Gøbel, Jens Dall Bentzen, Claus Hindsgaul and Lasse Holst Sørensen in proceedings of 16th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS, Copenhagen, July 2003.

The paper is selected and accepted for publication in special issue of "Energy".

I denne artikel beskrives resultater fra det fuldautomatiske anlæg (Viking-forgasseren), der frem til nu er resultatet af 15 års indsats. Det dokumenteres, at en lille tottrinsforgasser med en indfyret effekt på ca. 75 kW kører fuldautomatisk, har over 2000 timers drifttimer og en virkningsgrad fra biomasse til leveret el på over 25 %. Disse resultater viser sammen med det efterfølgende arbejde, (se afsnit 7.10) at udvikling af tottrinsforgasseren er lykkedes set ud fra en teknisk og videnskabelig synsvinkel.

#### **4. Formål**

Formålet med denne afhandling er at give en sammenfatning af resultater fra de gennemførte aktiviteter under Biomasseforgasningsgruppen med deltagelse eller under ledelse af Ulrik Henriksen.

Det er ligeledes formålet detaljeret at vise forskellige hjørnesteene af indsatsen, hvilket gøres ved udvælgelse af 11 publikationer, som vises i bilag.

Tottrinsforgasserens udvikling er valgt som hovedlinie, men også videnopbygning ved mere grundlæggende forskning (generelle emner) ønskes præsenteret og sat i sammenhæng til teknologiudviklingen inden for forgasning.

Det overordnede formål fra starten af forløbet sidst i firserne var ret klart:

Der var to væsentlige problemer forbundet med forgasning. Det ene var tjæreindholdet i den producerede gas, og det andet var askens uheldige egenskaber af korrosions- og belægningsmæssig karakter. Målet var at frembringe forgasningsprocesser, der løste disse to problemstillinger en gang for alle!

## **5. Baggrund**

Begrundelsen for at anvende vedvarende energi har varieret noget gennem tiden. I halvfjerdserne var det chokket over oliekrisen i 1973, der førte til, at mange ønskede at forbedre forsyningssikkerheden ved at anvende indenlandske brændsler.

Senere blev det også ønsket om at reducere udslippet af CO<sub>2</sub> til atmosfæren, der forårsagede, at biomasse og anden vedvarende energi fortsat var et område, mange interesserede sig for.

For trods alt må det siges, at vedvarende energi er en dyr måde at fremskaffe energi på, i hvert fald hvis det sammenlignes med kul og også andre fossile brændsler.

I den vestlige verden er det derfor ikke de rene omkostninger forbundet med energiproduktionen, der fører til anvendelse af vedvarende energi. Der kræves politiske beslutninger om afgift eller tilskud for at få anvendelsen af vedvarende energi til at være ved og til at brede sig.

Når så oven i købet de teknologier, der skal til for at nyttiggøre den vedvarende energi, først skal opfindes og udvikles, så er det ikke realistisk at lade de almindelige markeds kræfter stå for indførelsen af denne på mange måder attraktive energiforsyning. Dette skyldes først og fremmest at potentielle investorer ikke har en tilstrækkelig tillid til de politisk betingede fremtidige markeder for vedvarende energiteknologi.

Den gamle diskussion om hønen og ægget dukker op i denne sammenhæng.

Hvis der ikke findes en teknologi, vil der ikke være et marked, og hvis der ikke er et marked, vil der ikke blive udviklet en teknologi.

Dette gælder, uanset hvor meget forskning der gennemføres, og hvor meget viden der formidles.

For at bryde dette mønster kan der ved politiske beslutninger opbygges et marked, som teknologiproducenterne kan have tillid til. Dette har imidlertid vist sig at være ret svært at gennemføre.

En anden mulighed er at opbygge teknologi, som viser sig at fungere. Herved vil en investors risiko i at bygge teknologi være formindsket, samtidig med at der kan opstå et forbrugermæssigt krav om forbedrede vilkår for en sådan teknologi.

### **5.1 Biomasse**

Biomasse, der jo er en CO<sub>2</sub> neutral energikilde, har gennem mange årtusinder været anvendt som energikilde af mennesker. På verdensplan er det fremdeles en yderst vigtig energikilde.

Anvendelsen af biomasse i Danmark foregår primært i private brændeovne til rumopvarmning, på fjernvarmeværker eller i store kraftværkskedler til el og fjernvarmeproduktion.

I kraftværkskedlerne kan biomassen evt. anvendes som tilsatsfyring sammen med kul. Ved anvendelse af biomasse til decentral kraftvarmeproduktion i mindre anlæg vil en forgasning og efterfølgende anvendelse af gassen i en forbrændingsmotor give en høj el- og varmevirkningsgrad sammenlignet med traditionel dampbaseret teknologi.

Anvendelse af biomasse i separate kraftværkskedler koblet til en dampkreds giver et dyrt anlæg med en begrænset virkningsgrad sammenlignet med store kulfyrede anlæg.

Årsagen er, at biomassens aske har en uheldig korrosiv indflydelse på anlægget, hvis det optimeres mht. virkningsgrad. Tilsatsfyring af biomasse i kulfyrede anlæg giver en sammenblanding af kul og biomasseaske, hvilket hidtil har været uheldigt for den efterfølgende anvendelse af asken. Ved store tilsatte biomasseandele eller ren biomassefyring kan man desuden risikere at få korrosionsproblemer forårsaget af biomassens uorganiske bestanddele (aske). Specielt halms aske kan være uheldig.

Ved forgasning af biomassen og efterfølgende indfyring af gassen som tilsatsfyring i kulfyret kraftværkskedler kan problemet reduceres væsentligt, når hovedparten af asken kan tilbageholdes i forgasningsanlægget.

Anvendelse af forgasning af biomasse, specielt halm i forbindelse med tilsatsfyring, er af denne grund interessant.

Gennem firserne og halvfemserne var den politiske linie i dansk energipolitik nærmest af zig- zag- agtig geometri. Der var ikke overensstemmelse mellem de erklærede målsætninger og den praktiske politik. Samtidig kom naturgasprojektet med sine økonomiske vanskeligheder på tværs af mange gode hensigter. Da dette resulterede i den omtalte mistillid blandt private virksomheder, blev opskalering og demonstration af nye energiteknologier ret besværlig. Imidlertid var der rigelig med midler til at forske for. Også selv om det måske var mere relevant at afprøve nogle af de gode ideer i lidt større skala.

Nogle blev da alligevel prøvet, og resultaterne heraf har man stor gavn af i dag.

## **5.2 Biomasseforgasningsgruppens historie**

Tilbage i 1987 startede Halmforgasningsgruppen under ledelse af Erik Kofoed og med økonomisk støtte fra Elkraft og EFP aktiviteter indenfor videnindsamling om biomasseforgasning. Det stod dog ret snart klart, at der ikke var tilgængelig teknologi, der ville kunne bidrage væsentlig til forgasning af den danske biomasse. Denne blev først betragtet som bestående af halm, men senere også af træ.

Litteratur fra før og omkring anden verdenskrig, gav beskrivelse af de traditionelle forgasningsprincipper, modstrømsforgasning, medstrømsforgasning og tværstrømsforgasning. Fluidbedbaserede forgassere i forskellige konstellationer kunne ses beskrevet senere, hvor også nyere principper som f.eks. open-core og de la Coteforgassere var beskrevet.

I litteraturen var beskrevet forsøg med Traditionel medstrømsforgassere, de la Cote forgassere, Open-coreforgassere og Beenackers forgasser (Se ref. c-7). Nogle resultater viste forholdsvist lave tjæreindhold i den producerede gas. Ud fra litteraturen og samtaler med personer, der havde været involveret i nogle af undersøgelserne, var det ikke muligt at fastslå, om dette ville være realistisk ved egentlige forgasningsanlæg. Såvel forsøg med Open-core forgassere som traditionelle medstrømsforgassere havde nemlig også vist at der ind i mellem forekom alt for høje tjæreindhold i den producerede gas. Hertil kom beskrivelser af andre problemer.

Når man talte om halm var askens tendens til slaggedannelse og korrosionsmæssige egenskaber problematisk. Herudover betragtedes halmens struktur (strå) som vanskelig at håndtere.

Det måtte sluttes, at tjæreindholdet i forgasningsgas var det ene store problem, og askens slaggedannelse og korrosionsmæssige egenskaber var det andet.

Men selv hvis man kunne acceptere højt tjæreindhold i gassen, var det med hensyn til forgassere til forgasning af halm svært at se nogle oplagte kandidater.

Der blev nu iværksat eksperimentelle undersøgelser.

De første var ret simple forsøg med pyrolyse og efterfølgende koksfor gasning. Halm blev anvendt som brændsel

De første eksperimenter må siges mest at have pædagogiske formål, men ret snart dukkede der resultater op, som var overraskende positive - tottrinsforgasseren på DTU så dags lys.

Aktiviteter indenfor anvendelse af for gasning eller rettere pyrolyse i forbindelse med tilsatsfyring startede ligeledes sidst i firserne.

De politiske vinde blæste i to retninger. Nemlig anvendelse af for gasning og pyrolyse i forbindelse med tilsatsfyring af halm i kraftværkskedler og anvendelse af for gasning til decentral kraftvarme.

De eksperimentelle aktiviteter blev ret omfattende sidst i firserne, og da pyrolyse og håndtering af halm gav såvel lugt- som støvgener, blev det besluttet at bygge en forsøgshal langt fra fine måleinstrumenter, værktøjsmaskiner og maskinarbejdere. Halmfortet på DTUs forsøgsområde 120 blev opført og var klar til anvendelse foråret 1991. Medarbejderne i Biomassefor gasningsgruppen ville gerne have et skrivebord tæt på deres forsøgsopstillinger, og da de studerende tilknyttet disse aktiviteter simpelt hen stillede betingelser om at kunne sidde og skrive projekter nede på Halmfortet, opstod der et ret unikt og inspirerende forsknings- og studiemiljø omkring forsøgshallen med containere fulde af materialer og andre gode ting samt kontorpavilloner fulde af studerende og medarbejdere.

Biomassefor gasningsgruppen blev først ledet af Erik Kofoed og fra 1991 af Ulrik Henriksen.

Da Elværkernes interesse for decentrale anlæg i forbindelse med aftaler med regeringen i 1992 - 93 blev ret begrænset, og da EFP i henhold til forskellige regler og forordninger ønskede mere konkrete projekter i stedet for rammebevillinger, indså Henrik Flyver Christiansen, Energistyrelsen, at bevillinger til "alt det indimellem" ville blive nødvendigt for at et miljø, som Halmfortet kunne fungere optimalt. Derfor oprettedes i 1994 "Ressourcebaseprojektet" hvor Biomassefor gasningsgruppen blev en såkaldt "Ekstern ressourcebase" for Energistyrelsen. Først blev der givet små årlige bevillinger, men i 1999 var disse vokset til ca. halvdelen af gruppens budget. I 2000 blev ressourcebasen erstattet med det nyoprettede "Videncenter for termisk for gasning af biomasse og slutkonvertering til el og varme" som en del af Opfølgingsprogrammet.

Sidst i halvfemserne blev de samlede aktiviteter under Biomassefor gasningsgruppen formuleret i "Forsknings- og udviklingsprogram for termisk for gasning af biomasse".

Dette program omfatter alle aktiviteter - såvel forskningsprojekterne under EFP og CO<sub>2</sub>-ordningen som aktiviteterne i "Videncentret for termisk for gasning og slutkonvertering til el og varme".

Videncentret afvikledes i 2002 da UVE ordningen blev nedlagt som følge af regeringsskiftet.

## **6. Fremgangsmåde**

I starten var det tanken, at Biomasseforgasningsgruppen skulle indsamle viden ved at læse litteratur og rejse rundt og tale med institutioner og virksomheder. Resultaterne heraf skulle så formidles til de virksomheder og institutioner i Danmark, der måtte være interesseret i halmforgasning.

Der var som tidligere nævnt ikke meget at finde inde for halmforgasningen, og selv om der var en del forskningsresultater og udviklingsprojekter samt erfaringer fra gamle dage inden for træforgasning, fandtes ikke engang tilgængelig teknologi på dette område.

Arbejdsmetoden blev derfor af mere eksperimentel karakter end egentlig tiltænkt. Vi måtte selv få nogle erfaringer for at kunne stille de rette spørgsmål til omverdenen, men først og fremmest ville vi frembringe forgasningsprocesser, der på de væsentligste punkter var overlegne i forhold til, hvad vi havde set og læst.

Ambitionen var klar. Der var to væsentlige problemer forbundet med forgasning. Det ene var tjæreindholdet i den producerede gas, og det andet var askens uheldige egenskaber af korrosions og belægningsmæssig karakter. Vi ville frembringe forgasningsprocesser, der løste disse to problemstillinger en gang for alle.

Senere, da vi sidst i halvfemserne opstillede ”Forsknings- og udviklingsprogram for termisk forgasning af biomasse”, indeholdt vore arbejdsmetoder eksperimentelt arbejde på store anlæg og i laboratoriestørrelse, opstilling af teoretiske beregninger og grundlæggende forskning. Vores arbejdsmetoder blev fremstillet således:

- forsøg og målinger på egne opstillinger samt på forgasningsanlæg, der er bygget med henblik på praktisk drift
- samling og udvikling af teoretisk viden i en struktureret form, f.eks. i form af matematiske modeller.
- indsamling af erfaringer fra samt assistance og support til forgasningsanlæg, der er bygget med henblik på praktisk drift.
- tæt samarbejde med andre forskningsinstitutioner.

Resultaterne formidledes ved tekniske rapporter (herunder eksamensprojektrapporter og Ph.d. afhandlinger), ved videnskabelige artikler og foredrag, samt ved rådgivning til konkrete anlægsprojekter inden for området.

Prioritering og udvælgelse af indsatsområder og konkrete projekter skete i programmets styregruppe.

### **6.1 Forskning fører til teknologi eller er det omvendt?**

Dette er en lang diskussion, som der er en række forskellige synspunkter på, men det er en kendsgerning, at teknologi meget ofte ikke frembringes som et resultat af forskning. Tværtimod er meget forskning et resultat af, at eksisterende teknologi ønskes forbedret eller optimeret. Forskning kan også opstå, når teknologiske problemer ønskes løst, og man ikke helt forstår problemstillingens kerne.



Endvidere sker det ofte, at forskning, der sigter på løsning af et konkret problem, finder anvendelse helt andre steder, medens det oprindelige problem i mellemtiden bliver løst af andre veje.

Der er også altid en evindelig diskussion om, hvorvidt et bestemt forskningsprojekt nu er ”Grundlæggende forskning” eller ”Anvendt forskning”.

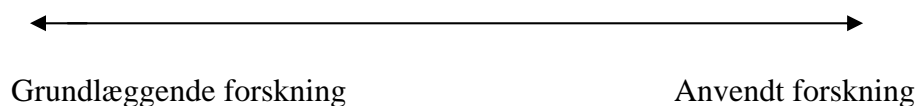
Mange tegner en ret linie, hvor der i den ene ende står ”Anvendt forskning”, og i den anden ende står der ”Grundlæggende forskning”.

”Anvendt forskning” betyder forskning, som er af praktisk karakter, og som har et klart anvendelsessigte.

Med ”Grundlæggende forskning” menes noget i retning af grundforskning.

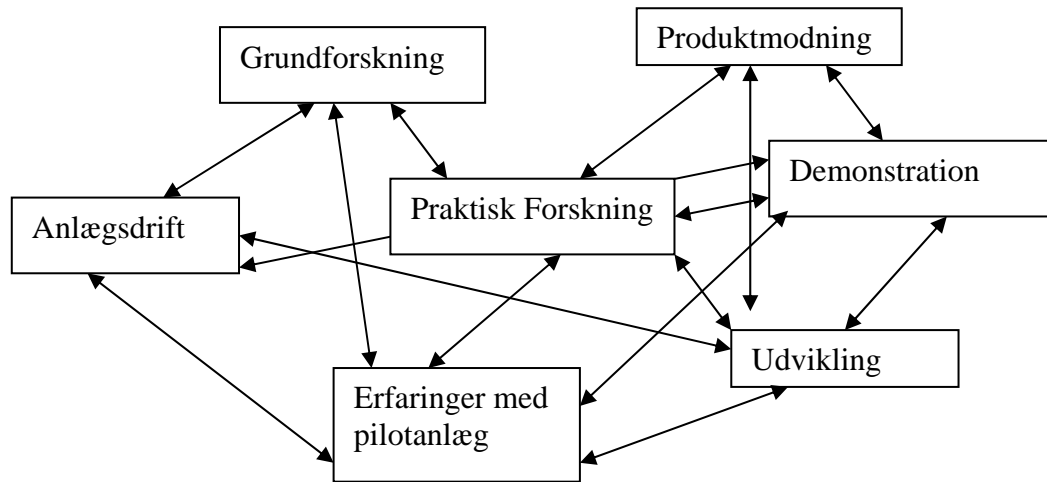
Tanken er nu, at et forskningsprojekt kan indplaceres på denne linie, alt efter hvor ”grundlæggende” eller hvor ”anvendt” den er.

Denne betragtning er ret let forståelig for personer der ikke har indblik i hvad forskning og teknologiudvikling er for noget, men for dem, der arbejder med disse dele til hverdag, virker denne betragtningsmåde alt for simpel. (Se figur 6.1).



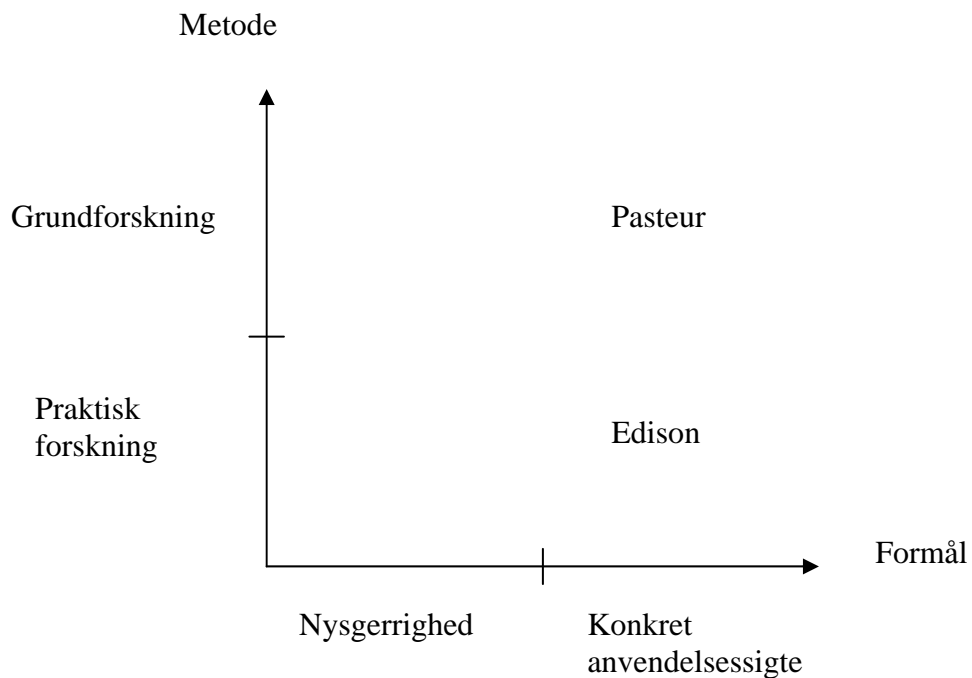
Figur 6.1      Simpel fremstilling af forskningen.

Et andet billede af forskning og udvikling er, at der findes mange gensidige interaktioner mellem forskellige forskningsmetoder og forskellige teknologiudviklingsstrin og færdig kommerciel teknologi. (Se figur 6.2).



Figur 6.2 Billede af samspillet mellem forskellige faser ved frembringelse af teknologi.

En tredje betragtning (Ref. c-6) fremstiller forskning på en todimensional måde. Her skelnes mellem metode og formål, som vises på hver sin akse. (Se figur 6.3). Denne fremstilling viser, at grundlæggende forskning udmærket kan være rettet mod løsning af konkrete teknologiske problemer, eksemplificeret med Pasteurs arbejde, hvorimod Edison gik mere praktisk til værks.

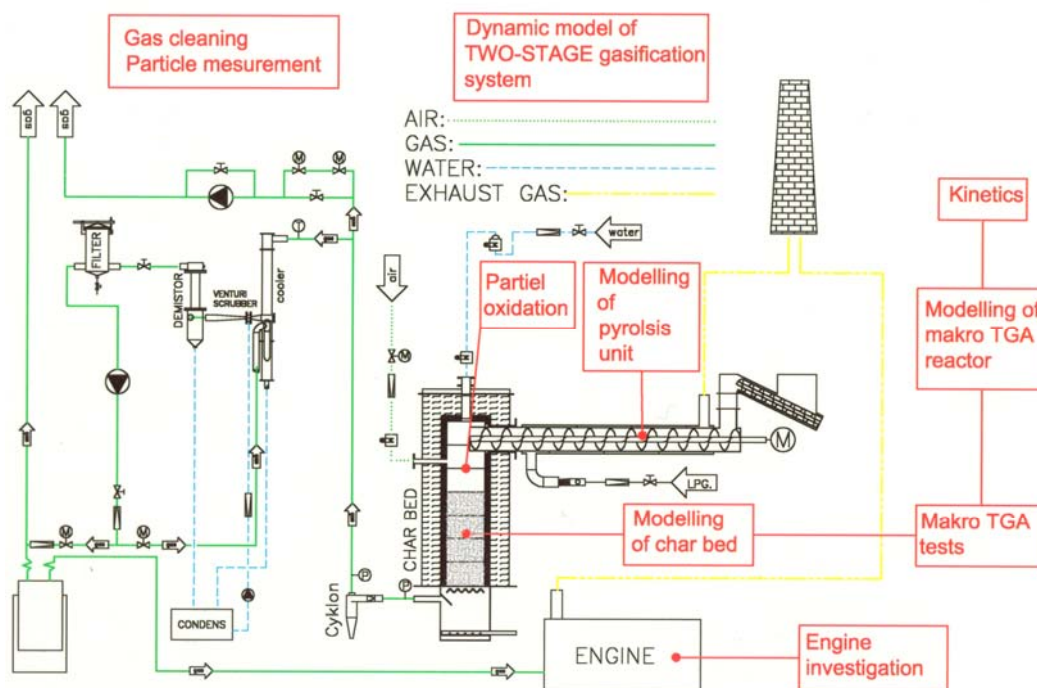


Figur 6.3 Fremstilling af forskningens metode og formål.

Erfaringen viser, at problemer og problemstillinger tit går i cirkler eller i spiraler. Når man tror, at man har forstået en problemstilling, og har løst den, dukker den op igen. Måske i en lidt ændret form. Man må ofte erkende, at det, man ud fra gode videnskabelige metoder tror, man har forstået, rent faktisk er langt mere indviklet, og at yderligere forskning er nødvendig. Dog stiger den samlede viden hele tiden som en spiral. (Man kommer hen over de samme områder flere gange, men hver gang på et højere niveau). Erfaringer som disse kræver, at man arbejder med det samme område i mange år, og at der er en vis udvikling i den teknologi, man beskæftiger sig med.

Et af de helt væsentlige gennemgående temaer i Biomasseforgasningsgruppens aktiviteter er tottrinsforgasning. Som vist på figur 6.4 fremgår det, hvordan man kan betragte denne forgasser som udgangspunkt for en række forskningsmæssige aktiviteter. Dette gælder reaktivitetsundersøgelser, gasrensningsaktiviteter, motorundersøgelser, varmeovergangsbetragtninger, koksbedmodellering og meget mere.

Ideen er, at resultaterne fra disse forskningsmæssige aktiviteter kan anvendes i mange andre sammenhænge end i forbindelse med udviklingen af Tottrinsforgasseren.



Figur 6.4 Figuren viser, hvordan tottrinsforgasseren kan betragtes som udgangspunkt for en række grundlæggende forskningsaktiviteter.

## **7. Forgasning sigtende på decentral kraftvarme.**

Da man som tidligere beskrevet ikke fandt egnede forgassere eller forgasningsprocesser til anvendelse for decentral kraftvarmeproduktion ud fra halm, blev der startet omfattende eksperimentelle aktiviteter. Forløbet førte ret hurtigt frem til positive resultater med totrinsprocessen. En oversigt over de etablerede forsøgsforgassere ses på tabel 7.1

Årstal	Betegnelse	Omtrentlig størrelse i kW	Reference	Omtalt på side
1988	Eksternt opvarmet forgasser 1	5	Ref. a-2	23
1989	Eksternt opvarmet forgasser 2	5	Bilag 1	24
1989	Internt opvarmet forgasser (Første totrinsforgasser på DTU)	3	Bilag 1	26
1990	50 kW forgasseren	50	Bilag 3	28
1992	Open-top forgasseren	50	Ref. a-13	32
1995	Fluidbed totrinsforgasser	50	Ref a-41	53
1995	450 kW anlægget i Blære	400	Ref. a-47	32
1996	100 kW forgasseren	100	Ref. a-51 Bilag 7	35
2000	LT-BIG	100	Ref a-67	54
2002	Hvirvelstrømsforgasser	50	Ref. b-19	51
2002	Viking forgasseren	75	Bilag 11	48

Tabel. 7.1 Oversigt over forgassere anvendt til forsøg i forbindelse med totrinsforgasningsprocessens udvikling under Biomasseforgasningsgruppen på DTU.

Efter at resultater fra forsøgene på DTU med totrinsprocessen (eller trinopdelt forgasning som den også kaldes) blev kendt, har en række danske virksomheder arbejdet med udvikling af forgassere, der baserer sig på dette princip. Også i andre lande ses interesse for totrinsprocessen, f.eks. er man hos Cirad, Agriculture Research for Developing Countries, Montpellier i Frankrig og Technishe Universitet, Graz i Østrig (ref. c-10) ved at opbygge Totrinsforgasser til forsøg.

### **7.1 Kort oversigt over termisk forgasning**

Termisk forgasning af et brændsel kan opdeles i to procestrin, pyrolyse og forgasning.

Ved pyrolyse sker en opvarmning af brændslet. Herved dannes gasser og kondenserbare bestanddele f.eks. en hel del tjærestoffer. Tilbage findes en koksrest, som hovedsagelig består af kulstof og uorganiske bestanddele (aske).

Koksresten kan herefter forgasses. Dette kræver at kulstoffet reagerer kemisk med et forgasningsmiddel, som typisk kan være CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> eller blandinger heraf. Den tilbageværende aske består af de uorganiske bestanddele, der ikke følger gassen.

I mange forgasningsanlæg foregår såvel pyrolyse som koksforgasning i samme reaktor, og i beskrivelserne skelnes som oftest ikke mellem de to processer.

Hvis gas produceret ved forgasning skal anvendes til motordrift, er det afgørende at gassen ikke indeholder væsentlige mængder af tjære og partikler, idet disse urenheder ødelægger motoren eller besværliggør driften. (Se afsnit 9.1).

Hvis den producerede gas skal anvendes til afbrænding, f.eks. i kraftværkskedler er tjærestoffer i gassen ikke et problem, men et udmærket brændstof. Her er det til gengæld afgørende, at uorganisk bestanddele f.eks. K, Na og Cl ikke findes i gassen i større mængder, da dette kan give korrosion på kedlens varme dele eller give belægninger og tilstopning i varmevekslere o.l.

Ønskes en forgasningsgas uden tjære eller med lavt tjæreindhold er der flere muligheder.

1. Tjæren kan renses ud af gassen med forskellige vådscribbere, elektrofiltre eller lignende. Herved tilbagestår at destruere eller på anden måde bortskaffe den udrensede tjære, der ofte er iblandet vand.
2. En anden mulighed er at krakke tjæren termisk til gas og kulstof ved høj temperatur (ca. 1300 °C).
3. Der er også den mulighed at dekomponere tjæren ved lavere temperatur over en katalysator. F.eks. har det naturligt forekomne mineral dolomit vist sig egnet til dette ved 800-900 °C.
4. Endelig er der mulighed for at anvende en trinopdelt forgasningsproces, der simpelt hen producerer en næsten tjærefri gas.

Asken fra brændslet kan have forskellige egenskaber med hensyn til blødgørings- og smeltetemperatur. Hvis reaktortemperaturen er høj, og man får en aske, der er smeltet, vil den ved afkøling danne slagge, der kan give belægninger og tilstopninger i forgasningsreaktoren og dennes askeudtagssystem. Endvidere vil høj reaktortemperatur øge muligheden for at uorganiske bestanddele følger med gassen i stedet for at følge med asken ud.

Der er derfor to hovedproblemer med termisk forgasning. Lave reaktortemperaturer resulterer i højt tjæreindhold, men problemerne med uorganiske bestanddele er begrænset. Høje reaktortemperaturer resulterer i lavt tjæreindhold, men giver stor risiko for problemer med de uorganiske bestanddele.

Etårige biobrændsler som f.eks. halm indeholder store mængder aske, og denne aske har som regel lave blødgørings- og smeltepunkter.

Det er et gennemgående problem, at kravene til gassens renhed, for at denne kan anvendes som motorbrændstof, ikke er særlig klare. Der er enighed om at tjære- og partikler er skadelige, men at nogle få milligram per normalkubikmeter gas kan accepteres er ret sandsynligt. Endelig kan siges at hvis tjære- og partikkelkoncentrationen kun er lille, kan yderligere rensning formodentlig let gennemføres ved filtrering.

## **7.2 Indledende eksperimenter med pyrolyse og forgasning af halm.**

Sidst i firserne blev der set på den eksisterende viden om halmforbrænding. Samtidig blev der set på procesbetingelserne i de eksisterende forgasningsprocesser, dels de traditionelle og dels de lidt nyere. Det var på denne baggrund ikke muligt at få øje på en forgasningsproces, der så ud til at ville kunne konvertere halm til en gas, der kunne anvendes som motorbrændstof.

Det besluttedes derfor at undersøge de grundlæggende processer, pyrolyse og forgasning eksperimentelt, dels for at blive fortrolig med processerne og få en fornemmelse for dem, og dels for at starte undersøgelser, der rettede sig mod at udvikle processer, der kunne omsætte halm til en ren gas.

Som det fremgår af ref. a-2, blev der fremstillet batch-reaktorer dels til pyrolyse af halm og dels til forgasning af den producerede koks med overheded vanddamp som forgasningsmiddel.

Tillige blev der udført eksperimenter med dekomponering af tjærestoffer fra pyrolysen med dolomit som katalysator ved temperaturer på mellem 800-900 °C. Det lykkedes ret let at producere gas, der ikke synligt indeholdt tjærestoffer.

Efter disse forsøg blev en eksternt opvarmet kontinuert virkende forgasser bygget. Der blev opfundet et indfødningsapparat, der kontinuert proppede halm ind i reaktoren gennem et 2" rør.

Forgasseren bestod af en reaktor, hvori såvel pyrolyse som forgasning fandt sted med overheded vanddamp som forgasningsmiddel.

Denne reaktor kunne forgasse halmen, og der blev påbygget en dolomitreaktor, der dekomponerede gassens tjæreindhold.

Forsøgene viste, at det kunne lade sig gøre at omsætte halm til en gas og at dekomponere tjæren i gassen over en dolomitreaktor.

Imidlertid viste der sig en række praktiske problemer med tilstopning af dolomitreaktoren, men forsøgene gav en klar optimistisk tro på, at målet måtte kunne nås. Videre forsøg med kontinuert forgasning blev iværksat.

Samtidig blev det klart, at en række stofværdier vedrørende pyrolyse af halm måtte tilvejebringes, således at processer indeholdende pyrolyse kunne modelleres, og reaktorerne kunne designes. (Se afsnit 8.1).

Samtidig måtte indholdet af tjærestoffer i den producerede gas måles, således at forgasningsprocesserne kunne vurderes også ud fra denne parameter. (Se under 8.3)

### 7.3 Eksternt opvarmet kontinuert forgasser.

Der blev iværksat videre forsøg med kontinuert forgasning af halm.

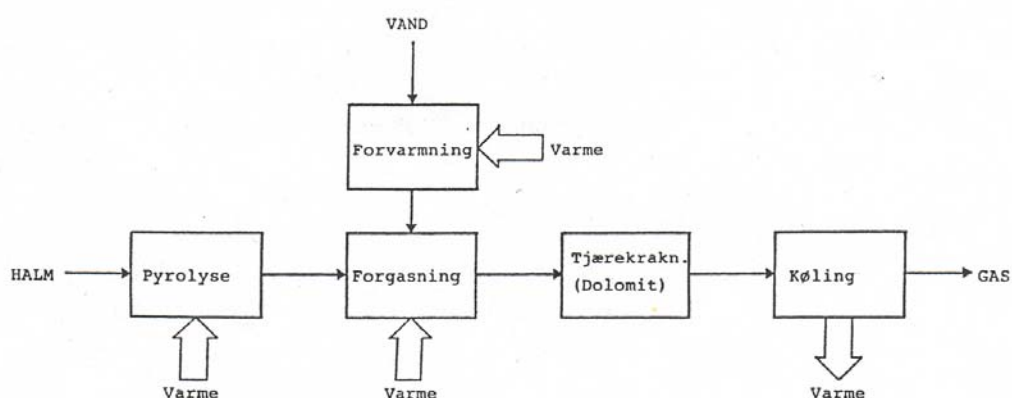
Der blev, som ved de indledende forsøg, valgt en ekstern opvarmet forgasser tilkoblet en ligeledes ekstern opvarmet dolomitreaktor til tjærenedbrydning.

Dolomit blev valgt i stedet for kommercielle katalysatorer, idet mange undersøgelser havde vist, at disse let forgiftedes af urenheder i gassen, således at levetiden var kort. Dolomit er et naturligt forekommende mineral, der bl.a. bruges som jordforbedringsmiddel. Dolomit er så billigt at en begrænset levetid eller et lille forbrug vil kunne accepteres.

Den eksterne opvarmning blev valgt for at kunne studere forgasning ved i videst muligt omfang at kunne variere parametre separat. Det vil sige at man herved kunne variere tilsætningsmængde og tilsætningssted, af vanddamp og biomasse, uden at dette i væsentlig grad fik indflydelse på temperaturerne. (Se bilag 1).

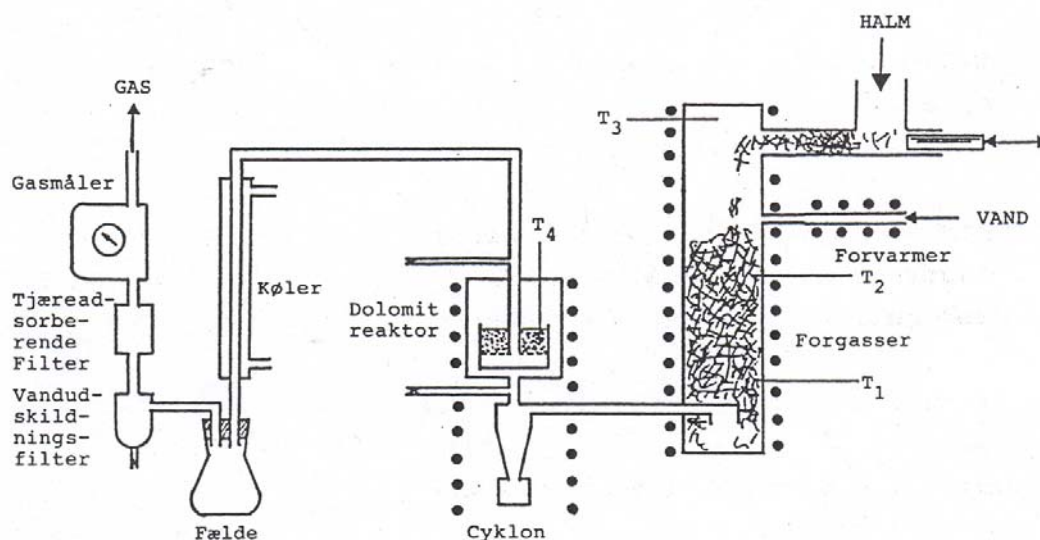
Procesdiagrammet ses på figur 7.1, og en skitse af forsøgsopstillingen på figur 7.2.

I reaktoren sker først en pyrolyse af den indfødte biomasse. Herefter reagerer den dannede koks hovedsagelig med vanddamp og producerer derved  $H_2$ ,  $CO$  og  $CO_2$ . Reaktionen er endoterme, og varmen hertil leveres af den eksterne opvarmning.



Figur 7.1 (Fra bilag 1, figur 2.1). Den anvendte proces ved eksternt opvarmet forgasning.

Tjæreindholdet i den producerede gas efter dolomitreaktoren og uden dolomitreaktoren ses i tabel 7.2. Med dolomitreaktoren kunne gassen renses til en kvalitet, der evt. efter yderligere filtrering måtte formodes at være ren nok til anvendelse som motorbrændstof.



Figur 7.2 (Fra bilag 1, figur 2.2). Skitse over den anvendte forsøgsopstilling ved eksternt opvarmet forgasning.

Samtidig ses at tjæreindholdet i gassen var uacceptabelt højt uden katalytisk efterbehandling. Sodproduktionen blev lokaliseret til at foregå, hvor pyrolyseprodukterne opvarmes, og det indikeredes at vanddamptilsætningsstedet havde indflydelse på sodmængden. Dog viste videre studier, at tilstedeværelsen af vanddamp hvor pyrolyseprodukterne opvarmes, ikke er tilstrækkelig til at reducere sodproduktionen væsentligt, som ellers påstået i bilag 1. (Se bilag 3).

Forsøg nr.			7	8	9
Halm ind	kg/h		0,60	0,60	0,60
Vand ind	kg/h		0,86	0,59	0,86
Dolomit	kg		1,3	1,3	0,0
Temp	T <sub>1</sub>	°C	890	890	900
	T <sub>2</sub>	°C	780	780	780
	T <sub>3</sub>	°C	330	330	330
	T <sub>4</sub>	°C	920	920	920
Gasmængde m <sup>3</sup> /h			1,08	1,04	—
Tjære	mg/m <sup>3</sup> gas		45	32	—
Tjære	mg/kg halm		81	55	6040

Tabel 7.2 (Fra bilag 1, tabel 2.3). Tjærekoncentrationen i den producerede gas for forskellige parametre. Det bemærkes, at ved forsøget uden dolomit findes store tjæremængder. Forsøgene er udført med den eksternt opvarmede forgasser.



#### 7.4 Internt opvarmet kontinuert forgasning (totrinsforgasseren)

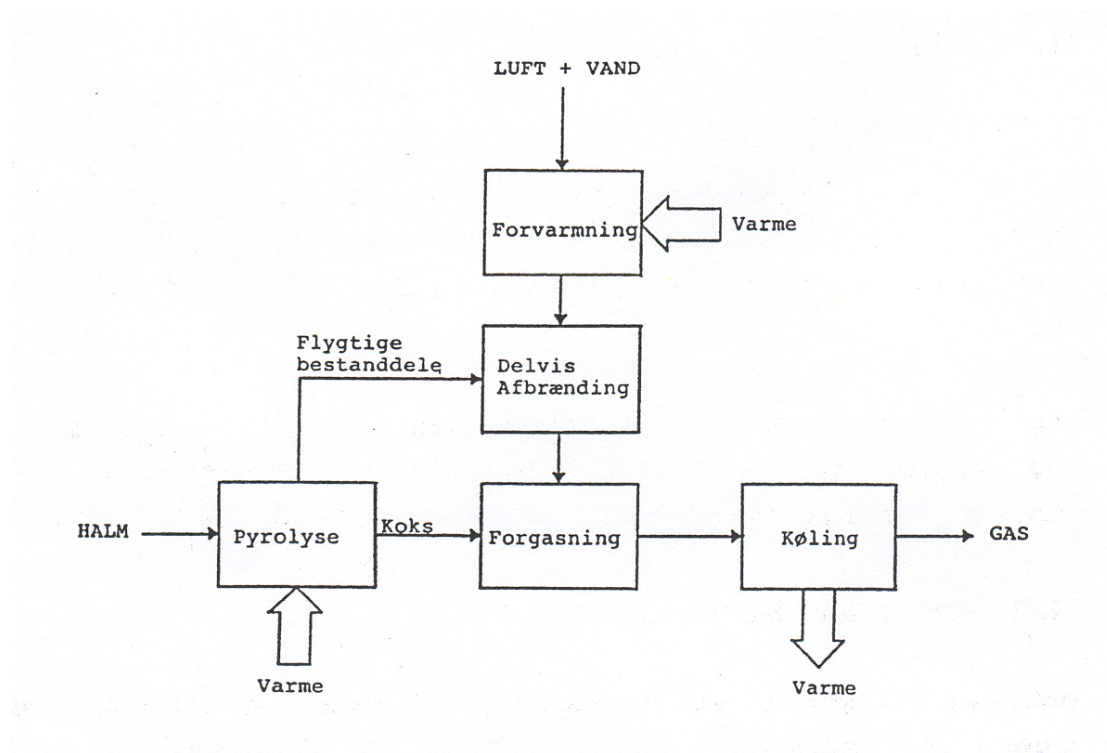
Efter resultaterne med den ovenfor beskrevne eksternt opvarmede forgasser blev det besluttet at gå et skridt nærmere en proces, der i større grad sigtede på opskalering. En ny laboratorieforgasser blev bygget. Som alternativ til den eksterne opvarmning tilsattes luft. Herved opnås at processen ikke behøver varmetilførsel udefra. Imidlertid blev der anvendt en aktiv isolering, der søgte at reducere varmetabet til nul.

Den eksterne opvarmede pyrolyseenhed blev bevaret fra den forrige undersøgte proces. Dette var dels fordi den i forvejen var monteret på indfødningssystemet, men også fordi den opvarmedes til temperaturer under 600 °C. Som varmekilde hertil kunne udstødningsgas fra en tilknyttet motor eller den producerede gas derfor tænkes anvendt, idet dette ville give god energiøkonomi. En opdeling af pyrolysereaktor og koksforgasningsreaktor blev herved opnået.

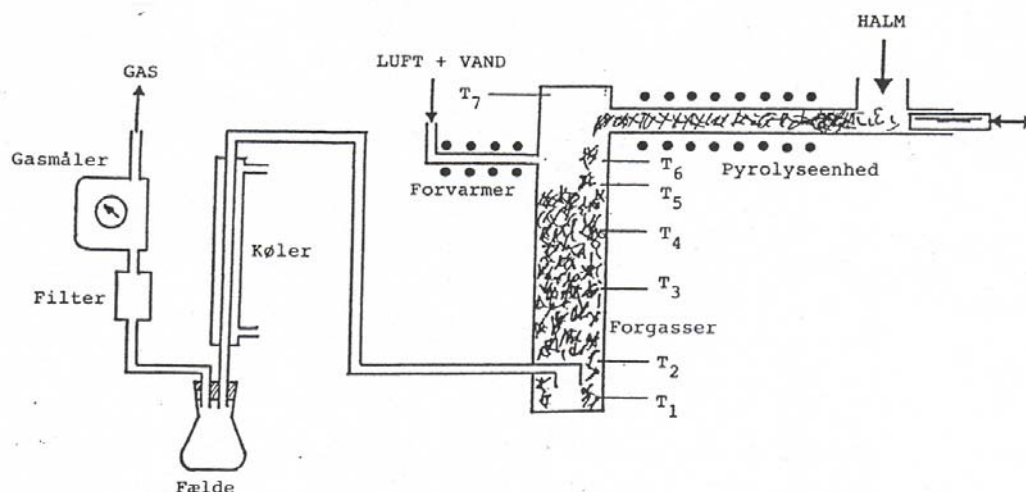
Luften tilsættes sammen med vanddampen tangentielt i toppen af forgasningsreaktoren. (Se bilag 1 og ref. a-5).

På figur 7.3 ses procesdiagrammet og en skitse af opstillingen ses på figur 7.4.

Pyrolyseprodukterne møder luft og vanddamp. Herved sker varmeudviklende (exoterme) partielle oxidationsreaktioner med ilten. Alt ilt opbruges herved, og de delvist afbrændte produkter ledes ned gennem kokslaget, hvor endoterme reaktioner mellem koks og H<sub>2</sub>O og CO<sub>2</sub> forgasser koksen.



Figur 7.3 (Fra bilag 1, figur 3.1). Den valgte proces til internt opvarmet forgasning.



Figur 7.4 (Fra bilag 1, figur 3.2). Skitse af forsøgsopstilling til forsøg med internt opvarmet forgasning.

En opbygget systemmodel (Se bilag 1 og ref. a-9 ) blev benyttet til at kvantificere virkningsgradspotentialet. Koldgasvirkningsgrader over 90% syntes realistiske, og sammenlignet med andre forgasningssystemer var dette yderst lovende.

Det var planlagt at tilkoble en dolomitreaktor til at dekomponere tjæren, men først skulle forgasseren realiseres.

Resultaterne af tjæremålingerne ses på tabel 7.3. Dette var meget overraskende. På trods af at der ikke var monteret nogen tjærenedbrydningsenhed, sås et meget lavt tjæreindhold i gassen. Bosh-sodtallet var også ret lavt.

Forsøg nr.		12	13	14	15
Halm ind	kg/h	0,60	0,60	0,60	0,60
Vand ind	kg/h	0,494	0,249	0,230	-
Luft ind	kg/h	0,624	0,665	0,625	-
Gennemsnitlig $T_2$	°C	930	930	930	930
Temperatur $T_6$	°C	820	815	804	800
Gasmængde (25°C)	m <sup>3</sup>	1,40	1,294	-	-
Tjæremængde	mg/m <sup>3</sup> gas	58	104	-	-
Tjæremængde	mg/kg halm	82	145	78	57
Sodtal (Bosch)		0,1	0,5	-	-

Tabel 7.3 (Fra bilag 1, tabel 3.3). Tjærekoncentrationen og sodtallet i den producerede gas ved forskellige parametre. Der ses meget lave tjærekoncentrationer. Forsøgene er udført på den første tottrinsforgasser på DTU.

Totrinsprocessen på DTU havde hermed set dagens lys.

Der sås ikke nogen form for slaggeproblemer, hvilket måske skyldtes at koksforgasningen foregik ved relativ lav temperatur, eller blot at der kun blev kørt korte forsøg. Samtidig sås at teknikken med at stoppe halmen ind i forgasseren gennem et 2 " rør ved hjælp af stempelindføderen, gav nogle briketagtige klumper af koks i forgasseren. At processen fungerede uden kanaldannelse og gennembrænding tilskrives bl.a. denne struktur. I denne sammenhæng er det også afgørende, at alle varmeudviklende (exoterme) reaktioner foregår i gasfase over brændslet, således at de reaktioner, der sker i brændslet, er (endoterme). Dette er i modsætning til andre kendte fixedbedforgassere og er kraftigt medvirkende til at netop problemer med gennembrænding undgås. (Se bilag 6).

For at vise at gassen kunne anvendes som motorbrændstof, blev en plæneklippermotor, som trak en lille elgenerator, drevet af forgasningsgas.

Det blev vist, at forgasserens virkningsgrad passede fint med de modelmæssige beregninger udført med den opbyggede systemmodel. (Se bilag 1).

Det var umiddelbart klart, at totrinsforgasningsprocessen havde en betydelig fordel frem for andre forgasningsprocesser ved at producere gas med meget lavt tjæreindhold. Det blev derfor besluttet at gå videre med denne type forgasser i en opskaleret version.

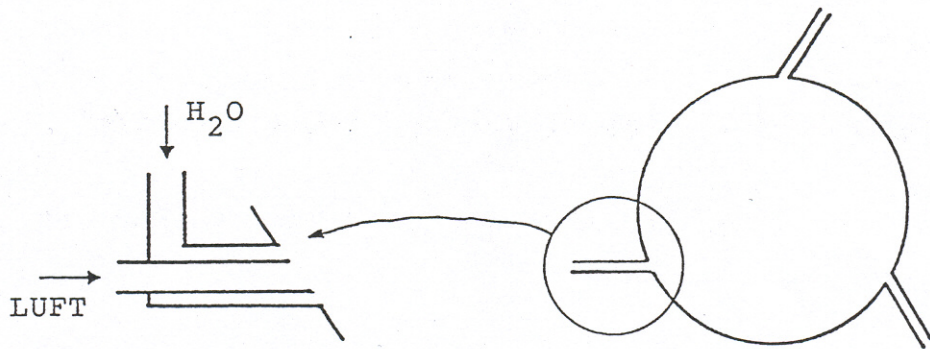
### **7.5 50 kW forgasseren**

En totrinsforgasser til forgasning af halm blev designet og bygget. Trods betænkeligheder blev det ud fra de gode erfaringer med laboratorieforgasseren besluttet at anvende en stempelindføder og et rør som pyrolysereaktor.

Der skulle dog en hel del forsøg til, før det lykkedes at finde en konstruktion, der fungerede. I et almindeligt rør skete en tilstopning, hvis røret blev for langt. Derfor fandt vi frem til, at der skulle monteres indvendige langsgående glideskiner. Dette arbejde blev udført sammen med projektet vedrørende anvendelse af pyrolyseprodukter som tilsatsfyring til overhedere i kraftværkskedler (Se afsnit 9.2.1).

Forgasningsreaktoren blev dimensioneret ud fra erfaringerne fra laboratorieforgasseren dvs. 2 liter reaktorvolumen pr. kW indfyret effekt. Forgasseren havde ingen rist, men et ringkammer forneden hvor gassen kunne strømme ud. Forgasseren havde ingen askeudmadning, og al aske akkumuleredes i bunden af forgasseren.

Forvarmet luft og overhedet vanddamp blev tilført tangentielt i fribordet over koksbedden, og blev opblandet ved indløbet. (Se figur 7.5).



Figur 7.5 (Fra bilag 3, figure 1.3). Skitse af indblæsningsdyser for luft og vanddamp fra 50 kW forgasseren.

For at anvende gassen til motordrift krævedes en gasrensning. Der blev undersøgt en række gasrensningssystemer og kombinationer heraf. De indledende test blev foretaget ved at rense luft blandet med vanddamp og røggas fra en gammel dieselmotor.

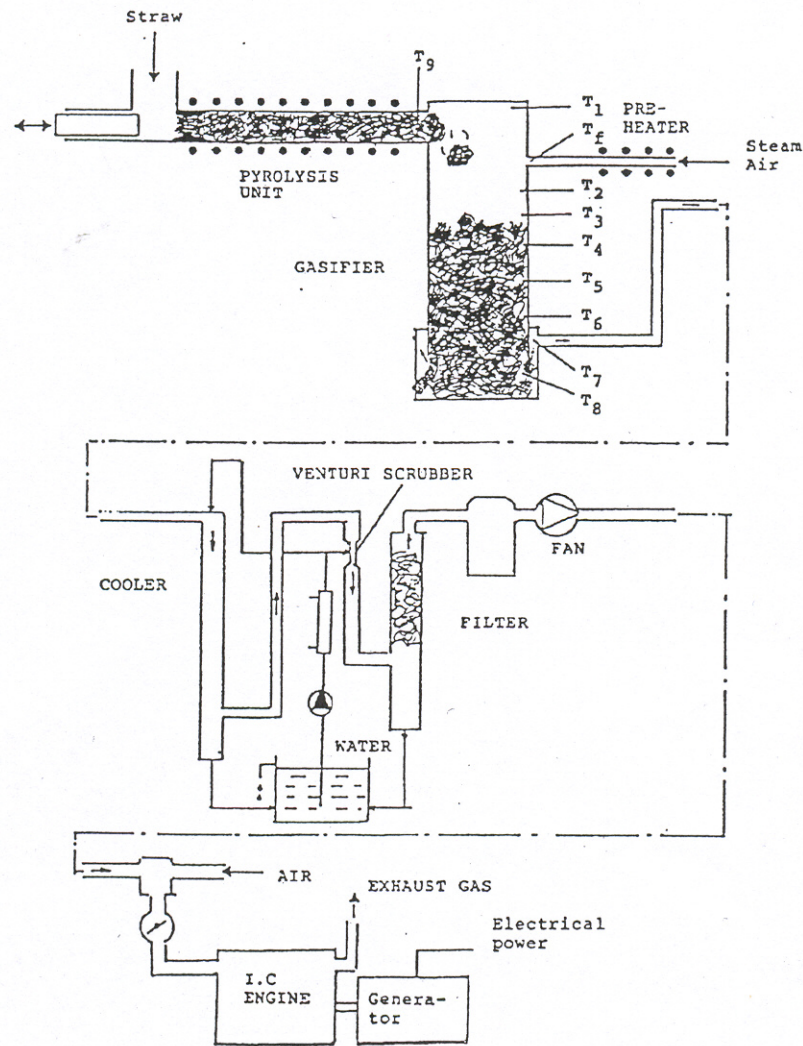
Der blev afprøvet forskellige scrubbersystemer og filtre. Gassen kunne nedkøles enten ved vandindsprøjtning eller med en rørkøler. Et af de systemer, der blev afprøvet, var en venturiscrubber. Ifølge litteraturen er denne scrubbertype den mest effektive til fjernelse af mindre partikler.

To af systemerne blev vurderet til at være væsentligt bedre end resten, og disse blev valgt til afprøvning på forgasningsgas fra den nye forgasser (se bilag 3). Det ene bestod af en vådscrubber bestående af en dyse, der sprayede vand ind i et tomt kolonnerør efterfulgt af et almindeligt papirfilter. Det andet system bestod af en venturiscrubber efterfulgt først af en demistor og derefter af et papirfilter. Gashastigheden gennem papirfiltret var ca. 0,01 m/s.

Som motor anvendtes en 1110 cm<sup>3</sup> Fordmotor indbygget i et lille kraftvarmesystem. (Se bilag 4).

Der blev kørt ca. 120 timer i alt med denne forgasser, fordelt over 8 forsøg.

Forsøgene med forgasseren viste, at dens ydelse nogenlunde var som forventet. Det var let at regulere temperaturen i toppen af forgasseren, og forgasningen gik jævnt og stabilt uden nogen kanaldannelser, brodannelser eller gennembrændinger. Tjæreindholdet var lavt, men sodindholdet i gassen var væsentligt højere end ved laboratorieforsøgene.



Figur 7.6 (Fra bilag 4, figur 2). Skitse af 50 kW forgasningsanlægget.

Forsøg med gasrensningen viste, at kun systemet, der bestod af en venturiscrubber efterfulgt af en demister og et papirfilter, gav en tilsyneladende effektiv rensning. Systemet med spraydyse og filter gav ikke en tilsyneladende ren gas. Skitse af anlægget ses på figur 7.6.

Vaskevandet recirkuleredes til venturiscrubberen uden tilstopningsproblemer. Rensning af vaskevand med et grovfilter og efterfølgende udfældning af partiklerne blev eftervist.

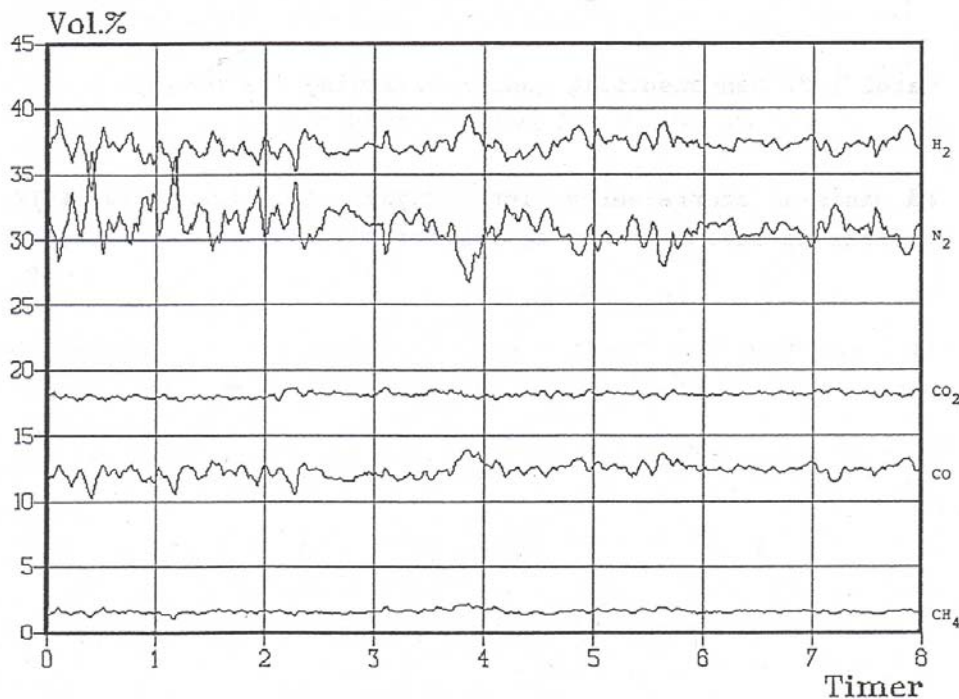
Det blev ligeledes eftervist at processen var nettovandforbrugende, således at afledning af vaskevand potentielt kunne undgås.

Motordrift på gassen blev afprøvet gennem i alt 20 timer. Motoren var for stor til, at forgasseren kunne levere gas til fuldlast. Fullast blev dog afprøvet ved at akkumulere gas på trykflasker til senere supplement. Resultatet var kraftig back-firing. Problemet



blev ikke løst på daværende tidspunkt, men en række mulige teorier vedrørende årsag blev vurderet. (Se afsnit 9.1.3).

Resultaterne var yderst lovende. Forgasseren kørte godt og stabilt, og der observeredes ikke brodannelse, gennembrænding eller lignende. Tjæreindholdet var lavt (38 mg/Nm<sup>3</sup> gas) sod og partikler kunne renses ud af gassen med en venturiscrubber og et filter. Vaskevandet kunne recirkuleres til scrubberen. Processen var nettovandforbrugende, således at der ikke burde komme et spildevandsproblem. På trods af back-firingproblemer kørte motoren udmærket på gassen. Eksempel på gassammensætningen ses på figur 7.7.



Figur 7.7 (Fra bilag 3, figur 1.11). Eksempel på forløb af gassammensætningen fra 50 kW forgasningsanlægget.

I forbindelse med undersøgelse af mulighederne for patentering fandtes en patentansøgning fra tyskeren Karl Kiener fra halvfjerdserne. Her var en proces meget tæt på tottrinsforgasseren beskrevet, men patentforpligtelserne var ikke overholdt, og princippet måtte betragtes som frit. Patentering af tottrinsprocessen var derfor ikke mulig.

Problemerne med back-firing i motoren bevirkede, at det blev besluttet at starte separate motorundersøgelser på en encylindret forøgsmotor i laboratoriet. Denne skulle udelukkende køre på gas blandet fra trykflasker.

I forbindelse med projektaktiviteter inden for tilsatsfyring var stempelindfødning af halm og pyrolyse i en rørreaktor opgivet til fordel for indfødning af løs halm i en pyrolysereaktor med en snegl som fremføringsorgan. (Se afsnit 9.2.1).

For at afprøve denne pyrolysereaktortypes egnethed i forbindelse med forgasning blev en simpel forgasser bygget. Denne forgasser gav mulighed for, at man visuelt kunne bedømme koksbeddens udseende ovenfra, idet toppen af koksforgasningsreaktoren udelukkende bestod af en aftagelig isoleringsplade. Forgasseren blev benævnt "Open-top forgasseren".

Resultaterne var ret entydige. Koks af løs halm fordelte sig ikke jævnt over hele tværsnittet i en koksforgasningsreaktor, men byggede op som en søjle under indfødningsstedet. En koksfordeler blev konstrueret, og det lykkedes også at få denne til at fungere, men ikke uden problemer med at fordeleren knuste koks, hvilket medførte uacceptable store tryktab over koksbedden.

Der blev også udført forsøg hvor den indstrømmende overhede vanddamp skulle fordele koksen. Dette kunne lade sig gøre, men viste ikke overbevisende resultater.

Denne forgasser blev brugt til at eftervise tottrinsforgasning af træflis. Til dette formål var den sneglebaserede pyrolyseenhed rigtig god. Ref. a-13 viser forsøg hvor dette afprøves. Dels fås en god pyrolyse af flis, og dels en efterfølgende god forgasning af koksen. Sammenholdt med modelberegningerne vistes herved at tottrinsforgasningsprocessen giver væsentlig højere virkningsgrader end andre traditionelle medstrømsforgassere.

Samtidig viste disse forsøg, at kapaciteten ved forgasning af træflis er ca. dobbelt så stor som ved forgasning af halm. Altså ved træflis skal koksforgasningsreaktoren rumme ca. 1 liter pr. kW indfyret effekt.

På denne baggrund samt på baggrund af resultaterne fra forsøg med 50 kW forgasseren besluttedes det at bygge et opskaleret tottrinsforgasningsanlæg til forgasning først af træflis og senere af halm. Anlægget skulle være på ca. 450 kW indfyret effekt.

## **7.6 450 kW anlægget i Blære**

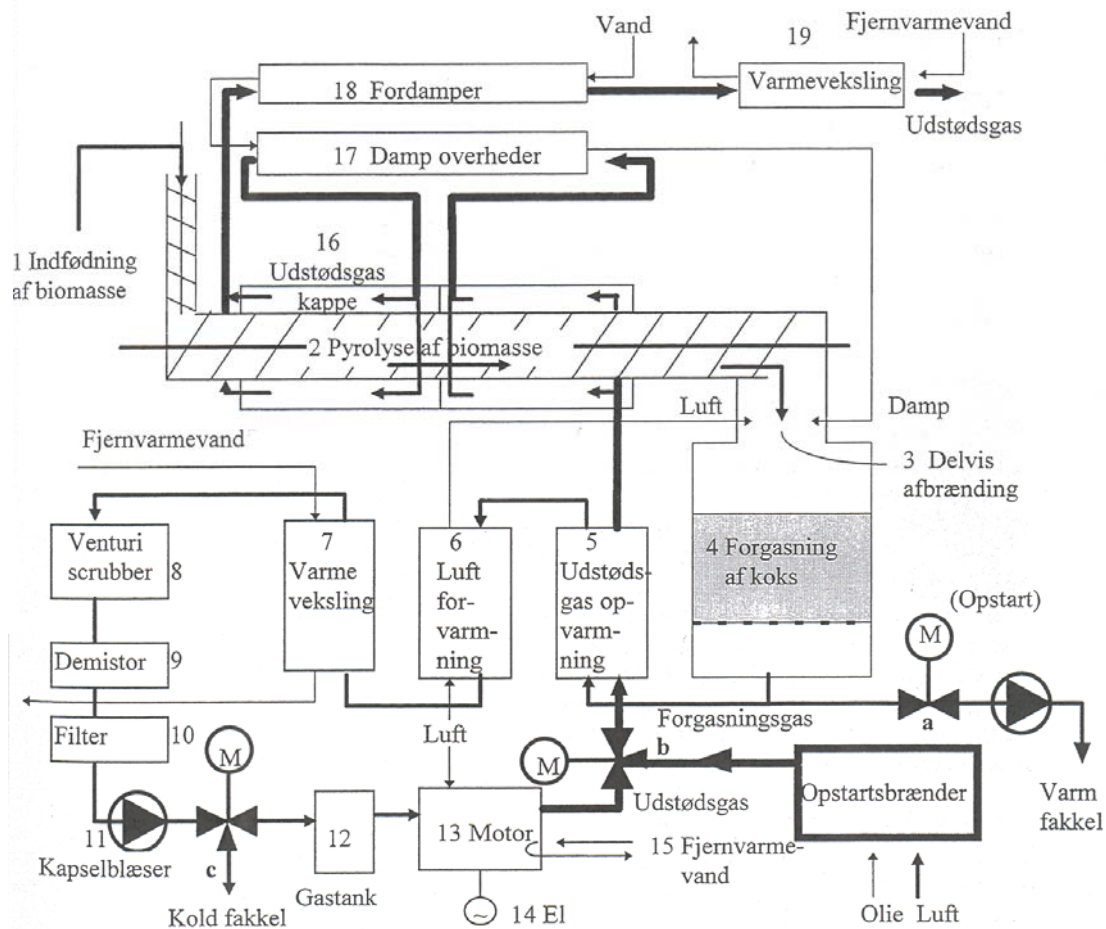
Der blev indgået samarbejde med Maskinfabrikken Reka A/S i Års om at bygge og afprøve et 450 kW (indfyret) forgasningsanlæg og videre kommercialisering af teknologien. Energistyrelsen, der finansierede projektet, krævede at forsøgsanlægget ikke måtte placeres hos DTU eller hos Reka, men skulle stå hos en anlægsvært. En gårdmand i den lille landsby Blære uden for Års blev anlægsvært.

Reka skulle bygge anlægget og stå for forsøgene, og anlægget skulle designes og konstrueres i et samarbejde mellem Reka og DTU. DTU skulle forestå indkøring og målinger.

Reka havde erfaring med riste til forbrændingsanlæg og skulle derfor designe risten, idet DTU ikke havde erfaring på dette område.

DTU skulle designe styring og reguleringen, medens styresystemet skulle bygges af en lokal underleverandør.

Anlægget var klar til afprøvning sidst i 1995 – kun få år forsinket. På figur 7.8 ses en principskitse af forgasningssystemet.



Figur 7.8 (Fra ref. a-47, figur 1). Skematisk tegning af 450 kW anlægget i Blære.

Ud over størrelsen adskilte dette anlæg sig på en række områder fra de forrige forsøgsanlæg med tottrinsforgasning. Bl.a. skulle dette anlæg have automatisk rist og askeudmadning, automatisk styring, automatisk indfødnings, den tilknyttede motors udstødningsvarme skulle bruges til at opvarme pyrolyseenheden, rågassen skulle forvarme luften til forgasseren, vaskevandet skulle recirkuleres til forgasseren, og forgasseren skulle konstrueres i materialer, der skulle kunne holde i lang tid (dvs. murværk). (Se ref. a-47).

Gasrensningssystemet bestod, som for 50 kW anlæggets vedkommende, af en rørkøler, en venturiscrubber efterfulgt af en demister og et papirfilter. Gashastigheden gennem gasfilteret var ca. 0.02 m/s.

### 7.6.1 Styring

Der blev udviklet en styringsfilosofi, der byggede på, at der etableredes fem drifttilstande. 1) Opvarmning af reaktoren. 2) Forgasning uden gasrensning, men med beskiddet gas til fakkelt. 3) Opvarmning med gasrensning, men med gas til fakkelt. 4) Forgasning med gasrensning og gas til gasklokke. 5) Nedlukning.



Under hver drifttilstand blev hver enkelt komponent enten automatisk eller manuel styret. For nogle komponenter kunne det vælges, om de blev manuelt eller automatisk styret, for andre komponenter var dette valg fastlagt i styringen.

Denne strategi sikrede, at man ikke kunne bringe anlægget i en uhensigtsmæssig situation.

Herudover var der indføjet en række sikkerhedsmæssigt begrundede dispositioner. Styrestrategien var baseret på erfaringer med pilotanlæggene på DTU. Styringen var baseret på en PLC med tilknyttet PC. Den lokale leverandør havde store problemer med at få systemet til at fungere, men da det kom til at fungere, viste det sig, at styrestrategien var effektivt.

Den oprindelige rist viste sig ikke at fungere. Derfor blev en ny ristekonstruktion, opfundet af Ole Christensen, DTU, afprøvet. Denne bestod af en række parallelle vinkeljern der kunne vippe fra side til side. Den nye rist fungerede godt og betegnes nu som Ole-risten. (Se figur 7.9). Tryktabet over koksbedden reduceredes som det skulle, når risten aktiveredes.



Figur 7.9 (Fra ref. a-47, figur 7). Skitse af den bevægelige rist konstrueret til 450 kW anlægget. Risten kaldes en "Ole-rist".

### **7. 6. 2 Resultater**

Det blev demonstreret, at tottrinsprocessen kan fungere i et anlæg på ca. 400 kW indfyret effekt med træflis som brændsel. Halm blev ikke testet.

Det blev eftervist at udstødningsgas fra en motor, der kører på den producerede gas kan være energikilde til en ekstern opvarmet pyrolyseenhed.

Det er vist at en bevægelig rist kan udtage aske fra forgasningen.

Bortset fra rensning af vaskevand eller recirkulering til forgasseren, blev det demonstreret at tottrinsforgasningsprocessen kunne realiseres i praksis.

Motoren kørte godt på den producerede gas, ingen bankning eller back-firing blev observeret.

Der blev kørt med forgasseren i over 400 timer, og der blev produceret el med motoren på forgasningsgas i over 100 timer. Der blev opnået en virkningsgrad på motoren fra gas til el på 25% og koldgaseffektiviteten var 82 %.

El-virkningsgrad fra biomasse til el var på 19,5% ( her blev kun 95% af den producerede gas ført til motoren, resten gik til fakkel. Motorens kompressionsforhold var kun 1:8).

Selv om tjæreindholdet i gassen ikke blev målt, viste inspektion af rør og varmevekslere, at der produceres gas med et lavt tjæreindhold. Der blev ikke observeret belægninger af nogen art i varmevekslere og rør.

Vaskevandet indeholdt størrelsesordensmæssigt 100 gange for høje koncentrationer af PAH, og nitrifikationshæmningen var for stor til at det kunne udledes som industrispildevand.

Efter de over 100 timers drift med motoren blev denne skilt ad for inspektion. Der blev observeret partikelophobning i sikkerhedsfiltret ved motoren. Samtidig blev der set belægninger i motorens forbrændingskammer. Der blev ikke set skader på motoren, dens drift var ikke påvirket, men belægningerne var uacceptable. (Se afsnit 9.1.2).

Det blev hermed vist, at den anvendte gasrensning ikke var tilstrækkelig effektiv.

Der blev efter forsøgene observeret revnedannelse i murværket i reaktoren, og der blev gennem forsøgene set revnedannelse i metalkonstruktionen i bunden af reaktoren.

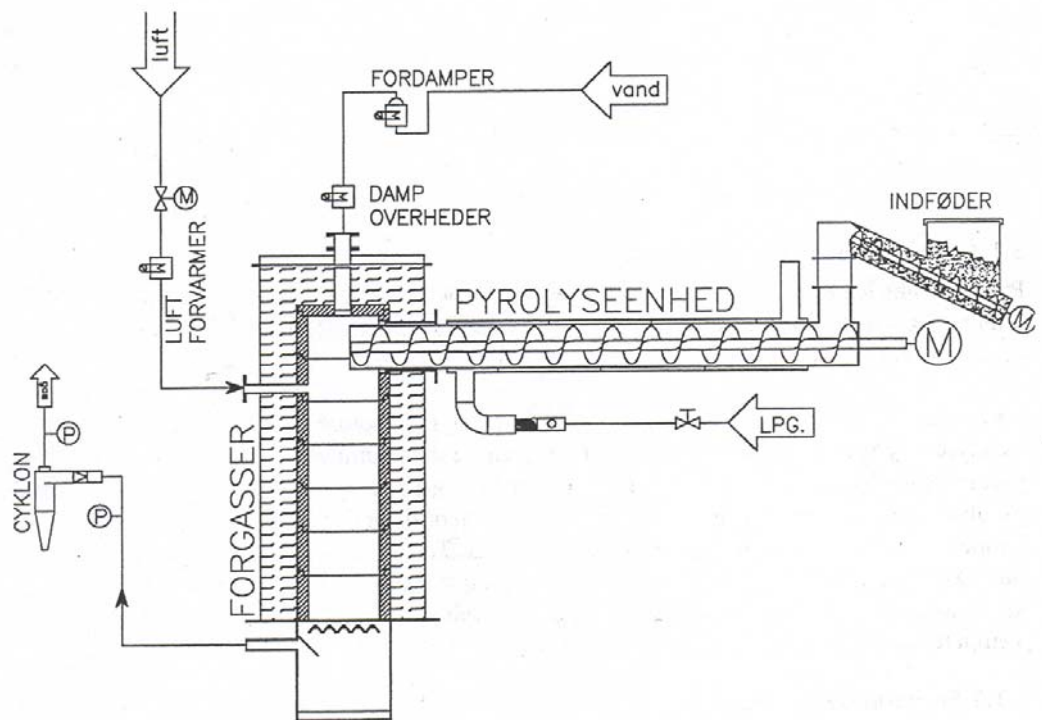
Der blev ikke set korrosive angreb i reaktorens metaldele (MA 253). Herudover blev der observeret mange vanskeligheder med at anvende ventiler og blæsere i den varme gas.

Det viste sig at være et meget stort praktisk problem, at forgasningsanlægget var placeret langt væk fra DTU.

### **7.7 100 kW forgasseren**

Det overordnede mål med projektet, der omhandlede 450 kW anlægget i Blære, var driftserfaringer, og det vurderedes, at det ville være vanskeligt at foretage optimering og problemløsning ved forsøg på dette anlæg. Det blev derfor besluttet at bygge en 100 kW forsøgsforgasser på DTU med det formål at gennemføre forsknings- og udviklingsprojekter sigtende på procesoptimering, samt ved forsøg at løse de problemer der måtte komme med 450 kW anlægget.

Forsøgsanlægget, der betegnes 100 kW forgasseren, havde en indfyret effekt på 100 kW, hvilket var noget mindre end anlægget i Blære. En skitse af 100 kW anlægget ses på figur 7.10. Anlægget blev bygget i 1995 og startet op første gang i 1996. De første egentlige forsøg blev gennemført i 1997, hvilket var efter at anlægget i Blære ikke længere var i funktion. 100 kW anlægget fik derfor en lidt anden rolle end planlagt, men en række af de problemer, der blev erkendt i forbindelse med forsøg i Blære, blev undersøgt.



Figur 7.10 (Fra ref. a-51, figur 1.1). Skitse af 100 kW forgasseren på DTU.

100 kW forgasseren står stadig på DTU og er funktionsdygtig. Der er foretaget en række ombygninger og forbedringer gennem tiden. Det seneste forsøg blev gennemført med halmpiller i 2001.

Anlægget består af en ekstern opvarmet pyrolyseenhed. Opvarmningen sker med en propangasbrænder. Dette er for at gøre anlægget uafhængigt af en motors udstødningsvarme.

Forgasseren er en udmuret cylinder bygget af rørringe. Nederst findes en bevægelig rist efter samme princip som udviklet til Blære anlægget (en Ole-rist). Under denne er der et volumen hvor aske akkumuleres. Først i forbindelse med halmpilleforsøgene i 2001 blev et kontinuert askeudmadningsudstyr etableret.

Først betragtes forsøg frem til 1998 beskrevet i ref. a-51.

Efter de indledende forsøg, hvor anlægget blev gjort funktionsdygtigt, blev der iværksat en række undersøgelser. Efter indkøringen deltog vi i et europæisk projekt, hvor forskellige forgasningsanlæg skulle afprøves på et briketbrændsel kaldet "Standard gasifier fuel" (SGF). (Se ref. a-38).

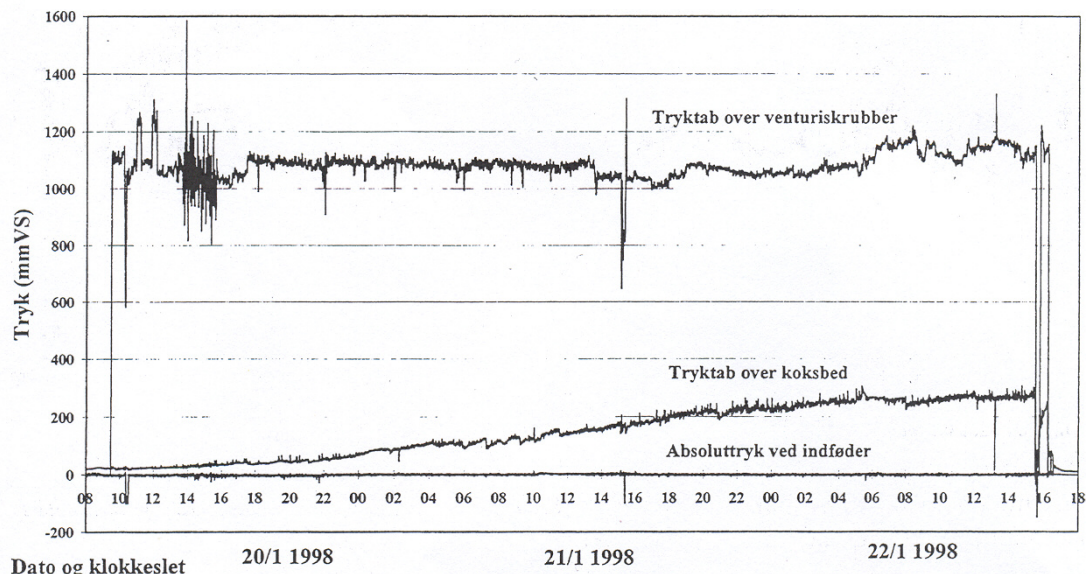
Herefter blev der tilknyttet en motor, der blev indkørt. Endelig blev der gennemført en række tests, hvor fokus blev rettet mod gasrensning og karakterisering af gassens urenheder. Senest er som nævnt gennemført forsøg med forgasning af halmpiller tilsat antisintringsmiddel.

### **7.7.1 Resultater**

Under forsøgene med SGF-brændslet viste forgasseren, at den kørte godt og stabilt. På figur 7.11 ses tryktabet over risten i de 50 timer forsøget varede.

Tjæremålinger blev foretaget af Biomass Technology Group (BTG) fra Holland Teknologisk institut, Århus (TI) og DTU. Der var store forskelle i resultaterne. Det viste sig dog, at der var op mod 10 gange større tjæreindhold i gassen end forventet. Resultaterne fra de andre forgasningsanlæg i Europa havde endnu større tjæreindhold i deres gas.

Koldgasvirkningsgraden blev målt til 88 %, hvilket også var bedre end hvad andre forgassere kunne præstere på SGF brændslet. (Se ref. a-39).

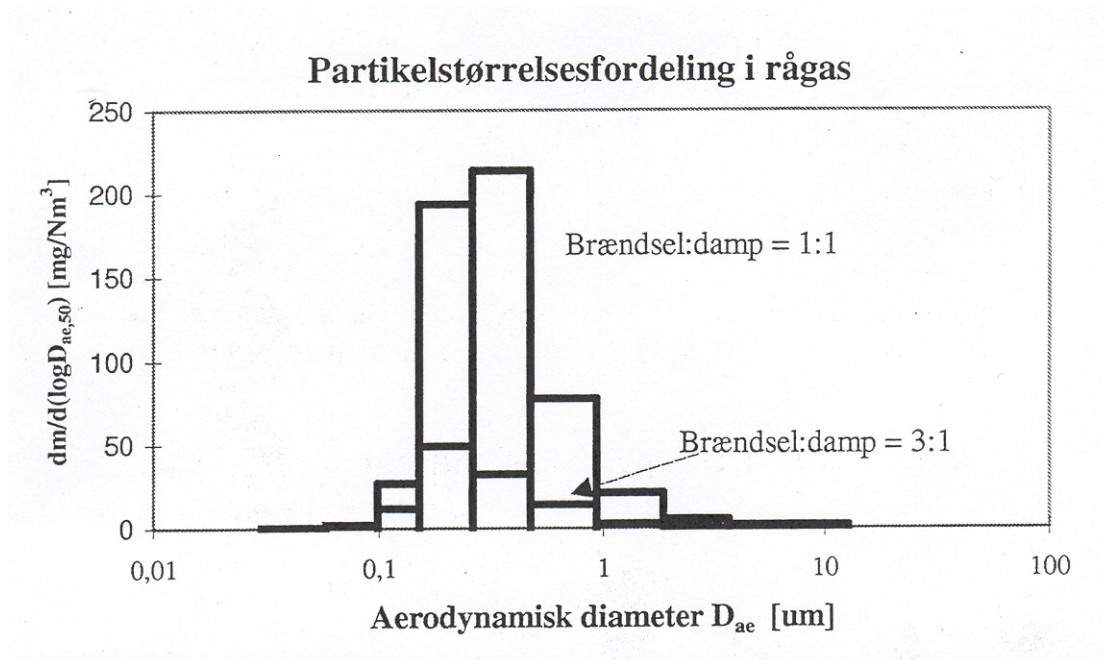


Figur 7.11 (Fra ref. a-51, figur 8.1). Tryktab over koksbedden og trykket ved indføderen ses gennem et forsøg på ca. 3 døgn. Tryktabet over koksbedden stiger jævnt og stabiliseres sidst i forsøget.

Godt nok var resultaterne bedre, end hvad der blev målt på de øvrige europæiske forgassere, som indgik i undersøgelsen, men set i lyset af hvad der tidligere var opnået med totrinsforgassere, syntes resultaterne ikke at være tilfredsstillende. Det vurderedes, at en forbedring af forgasseren krævede yderligere viden om gassens urenheder.

Der blev derfor gennemført forsøg, der sigtede mod at karakterisere urenhederne i gassen samt at rense gassen. Det anvendte brændsel var her løvtræsflis. Karakteriseringen gik ud på at måle partiklernes størrelsesfordeling og undersøge partiklernes tjærelægninger. (Se afsnit 8.7).

Resultaterne viste, at partikelmængden afhænger af forgasningsparametrene f.eks. af forholdet mellem brændselstilsætning og vandtilsætning. Størrelsesordensmæssigt lå partikelkoncentrationen mellem 100 og 1000 mg/Nm<sup>3</sup> gas. Et eksempel er vist på figur 7.12.



Figur 7.12 (Fra ref. a-51, figur 4.5). Størrelsesfordelingen af partikler i rågassen fra 100 kW forgasningsanlægget ved to forskellige forhold mellem tilføjet brændsel og vanddamp.

Den typiske middelpartikeldiameter er omkring 0,2  $\mu\text{m}$ .

Der blev gennemført omfattende forsøg vedrørende forbedring af gasrensesystemet. På baggrund af de tidligere positive erfaringer på DTU, og de noget mere negative erfaringer i Blære med venturiscrubbere, blev denne metode først undersøgt i sammenhæng med forskellige dråbefangere (demistorer). Endvidere blev forskellige andre scrubbere og filtre undersøgt.

Under forsøgene blev forskellige venturiscrubberudformninger testet, og forskellig gashastighed samt forskellig vandtilsætning blev afprøvet. Det viste sig, at for de scrubbere, hvis design lå tæt på det som foresloges i litteraturen, var der ikke den store forskel i effektivitet og tryktab. De mere "innovative" design gav ikke bedre rensning, men større tryktab i gasstrømmen. Det sås som forventet, at scrubbernes effektivitet samt tryktabet afhang af den tilsatte vandmængde. Der kunne ikke konstateres nogen væsentlig effekt ved ændringer af den anvendte demistor.

De bedste scrubberes effektiviteter lå mellem 60 og 90 %, således at nogle forsøg gav de høje effektiviteter, andre de lave. Årsagen til forskellene blev ikke fastslået.

Venturiscrubberen efterfulgt af et papirfilter (10  $\mu\text{m}$  filter normalt anvendt som luftfilter til en motor) resulterede i, at gassen blev rensat til mellem 0 og 5  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  og var derfor ren nok til anvendelse i en motor.

Forsøgene bekræfter hermed resultaterne fra 50 kW forsøgene på DTU, men forklarer ikke, hvorfor der var partikler i for store koncentrationer i den rensede gas fra 450 kW anlægget i Blære.

En alternativ måde at rense partikler ud af gassen på kunne være filtrering ved en temperatur lidt over vanddugpunktet. Herved ville man undgå sammenblanding af partikler (og hvad der måtte sidde på dem af vandopløselige bestanddele) med kondensatet. (Se ref. a-59).

På trods af at udenlandske undersøgelser ikke anbefaler posefiltrering, blev der parallelt med partikelkarakteriseringsundersøgelsen afprøvet et lille posefilter. Dette blev prøvet i 3 timer, og det fungerede godt. Der blev opnået en renseeffektivitet på 97%, og partikelindholdet i den rensede gas var under 5 mg/Nm<sup>3</sup>, hvilket er tilfredsstillende. Det viste sig også, at bagskylning med nitrogen gav en sænkning af tryktabet til et stabilt niveau.

For de forsøg, der blev gennemført i forbindelse med gasrensingsundersøgelsen, blev der målt koldgaseffektiviteter på 88-90%.

Målinger af tjæremængden i rågassen viste sig at ligge mellem 50 og 400 mg /Nm<sup>3</sup>. Som ved SGF-forsøgene var dette væsentligt over, hvad der tidligere var opnået med en tottrinsforgasser, og der blev startet en undersøgelse af, hvad årsagen til at der nu målt høje tjæremængder kunne være. (Se også 8.3).

Det var gennem de seneste forsøg konstateret, at hvad der skete med forgasseren i Blære skete også her. Murværket revnede efter de første få forsøg. Dette betød, at gas efter den partielle oxidation kunne løbe uden om koksbedden, ned igennem risten og ud i den producerede gas. Det er vist bl.a. i referencerne a-35, a-48, a-49 og i bilag 8, at der selv efter den partielle oxidation findes en del tjære i gassen.

Hertil kom at tjæreindholdet i gassen målt efter den partielle oxidation var højere, end hvad der var set i tidligere laboratorieundersøgelser.

Temperaturmåling blev foretaget dels med termoelementer et par centimeter inden for reaktorvægen i reaktoren, men herudover blev der foretaget en måling af temperaturen i toppen af forgasseren ved den partielle oxidation. Dette foretoges med infrarød spektrometri. Der var betydelige temperaturvariationer øverst i reaktoren med temperaturspidser op til 1400 °C. Overfladetemperaturen af koksbedden blev målt til mellem 900 og 980 °C.

Der blev opbygget en motorprøvestand i tilknytning til forgasseren. Motoren blev udstyret, så den kunne køre på såvel naturgas som på forgasningsgas.

Forgasseren kunne køre uafhængigt af, om motoren kørte eller ej, idet udstødningsgassen fra motoren ikke var tilkoblet forgasseren.

Motoren, der var en firecylindret Ford 11 motor, var tilkoblet en Zeulner hvirvelstrømsbremse til måling af effekt og moment ved forskellige driftforhold. (Se afsnit 9.1 om motorundersøgelser).

Koksens egenskaber som aktiv kul blev undersøgt. Det blev vurderet, at koksen var velegnet til at rense spildevand til en kvalitet, hvor det kunne udledes. Vedrørende rensning til drikkevandskvalitet vurderedes koksens indhold af kobber og mangan problematisk.



Den mekaniske styrke af koksen var ret lav, og koksen kunne udelukkende anvendes som pulver.

Kondensatet fra forskellige forgassere indeholder en række organiske forbindelser (bl.a. PAH og phenol), der gør det uegnet til udledning. Det blev forsøgt at anvende koksen til at rense sådant kondensat, men med varierende resultat.

Der blev lavet balance for salte og tungmetaller i flisen.

Kun ganske lidt salt blev fundet i kondensatet, hvilket forbedrer muligheden for succesfuld tilbageføring af vaskevand til forgasseren. Cadmium fandtes primært i cyklonasken. (Se ref. a-51 og ref. c-2)

Koksomsætningen var fuldt acceptabel. Efter forsøget viste prøvetagning i koksbedden, at der var en omsætningsgrad på over 95% i materialet lige over risten. Der er givet forklaring på, hvorfor tryktabet per længdeenhed ned gennem koksbedden vokser. (Se bilag 9).

Kanaldannelse, brodannelse og gennembrænding er ikke observeret under driften. Forhold vedrørende kanaldannelse er diskuteret i bilag 6.

Ved disse forsøgs afslutning havde forgasseren kørt sammenlagt 278 timer (eksklusiv opvarmningsperioder.)

## **7.8 Optimering af 100 kW forgasseren**

Der blev planlagt en optimering af forgasseren sigtende på at reducere tjæremængden i den producerede gas. (Se bilag 7, bilag 8 og ref. a-56).

Målingerne før denne optimering viste, at tjæreindholdet i gassen lige efter den partielle oxidation var højere end forventet, og at tjæreindholdet i den producerede gas lige før rensning (i rågassen) ligeledes var væsentligt højere end forventet.

En mulig forklaring på at tjæreindholdet efter den partielle oxidation var højt kunne være, at luftdyserne ikke gav tilstrækkelig opblanding, og at dele af pyrolysegassen undgik den partielle oxidation.

### **7.8.1 Modifikationer**

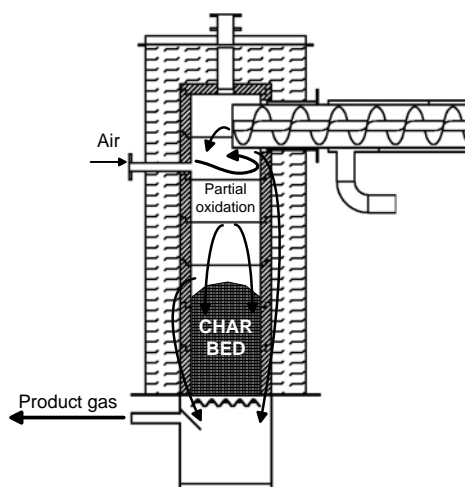
Det besluttedes derfor at forbedre luftdyserne, således at en bedre luftfordeling kunne opnås. Dette skete bl.a. ved, at der blev opbygget en fysisk model af forgasserens top i fuld skala. Modellen var gennemsigtig, og forskellige luftdyseudformninger blev nu afprøvet ved at røg fra en røgmaskine blev tilsat enten til luftindblæsningen, eller der hvor pyrolyseprodukterne i den rigtige forgasser ville strømme. Det oprindelige luftindblæsningssystem bestod af tre dyser med hver et hul. Dyserne indblæste luften med en vis tangentiell hastighedskomponent ( $45^\circ$  i forhold til radius). I reaktoren hvor, den partielle oxidation fandt sted, var diameteren 450 mm. Ved optimeringen blev diameteren på dette sted indsnævret til 175 mm.

Systemet med de tre dyser blev bevaret, men strømningsforsøgene førte til, at hver dyse nu fik hver 5 huller. Disse huller havde retning som en vifte, der indblæste luften i retninger fra tangentielt til radiært. Hastigheden i hvert hul beregnedes til 70 –90 m/s.

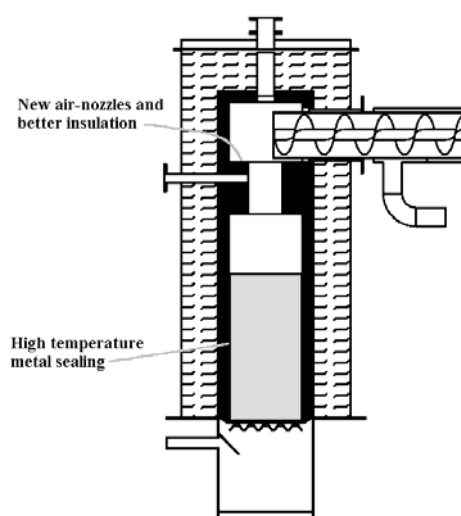
Ved inspektion af forgasseren blev der observeret revner i murværket, som udgjorde reaktorens væg. Dette muliggjorde, at tjæreholdig gas fra pyrolyse og fra den delvise

afbrænding kunne passere uden om koksbedden. Observationer af reaktorens ydre under forsøg havde vist, at der opstod varme pletter på reaktorens svøb. Dette indikerede klart, at varm gas passerende uden om koksbedden ude i isoleringsmaterialet. Forsøg viste, at efter partiel oxidation af pyrolysegas var der fremdeles en hel del tjære i gassen (Se afsnit 8.3). Litteraturen beskrev muligheden for tjærenedbrydning i en koksbed. På denne baggrund måtte man gå ud fra, at netop gassens passage gennem tottrinsforgasserens koksbed havde en væsentligt tjærereducerende effekt. Det måtte derfor sikres, at al gas passerer gennem koksbedden.

Der blev nu konstrueret og indsat en foring udført af højtemperaturstål i reaktoren, og denne fæstnedes til bunden, således at intet gas kunne by-passe koksbedden.



Figur 7.13 (Fra bilag 7, figur 2). Skitse af 100 kW forgasseren før optimeringen. By-pass af gas uden om koksbedden er vist.



Figur 7.14 (Fra bilag 7, figur 3). Skitse af 100 kW forgasseren efter optimeringen. En metalforing i reaktoren tvinger al gassen gennem koksbedden.



At diameteren i toppen af forgasseren blev indsnævret, og at gas ikke længere kunne passere ude i isoleringsmaterialet ville resultere i et mindre varmetab fra reaktoren. Ombygningen gennemførtes, og på figur 7.13 og 7.14 ses skitser af reaktoren før og efter.

### **7.8.2 Resultater**

Der blev udført parallelmålinger af tjæremængden i gassen. Teknologisk institut, Århus (TI) og DTU (med SPA-metoden) målte tjære. Der var god overensstemmelse mellem målingerne. Resultaterne fra forsøget var som forventet et kraftigt fald af tjærekonzentrationen i den producerede gas. Tjærekonzentrationen var nu faldet til mellem 5 og 25 mg/Nm<sup>3</sup> i rågassen. Der blev set en reduktion i tjærestofferne over den partielle oxidation på mellem 90 og 95 %, og ved passagen gennem koksbedden sås en yderligere reduktion på 98-99 %.

Der blev tillige opnået en reduktion af varmetabet og dermed en forbedring af koldgasvirkningsgraden, der nu var 92%.

Partiklerne i den producerede gas blev undersøgt, og lavtryksimpaktorundersøgelser udført af Institut for Kemiteknik, DTU viste, at partiklernes størrelsesfordeling var som før optimeringen dvs. gennemsnitsstørrelsen på massebasis var ca. 0,2 µm. Konzentrationen af partikler var imidlertid steget med op til en faktor 3. (Se afsnit 8.7).

Ved hjælp af infrarød teknik udført af Risø vistes, at temperaturen i den partielle oxidationszone var omkring 1150 °C, og koksoverfladens temperatur var mellem 900 og 980 °C. Dette var ikke forandret ret meget som følge af optimeringen.

Gasrensning blev udført med en cyklon, en venturiscrubber, en demistor efterfulgt af et patronfilter. Partikelstørrelsesfordelingen efter venturiscrubberen blev målt, og dette viste ikke som forventet forholdsvis flere små partikler sammenlignet med målinger foran scrubberen. Størrelsesfordelingen var stort set som foran scrubberen. Efter filteret var partikelmængden meget lav og efter nogle timers drift var partikelkonzentrationen under 5 mg/Nm<sup>3</sup>.

Kondensatet fra forgasseren blev filtreret for partikler og efterfølgende undersøgt for PAH, for nitrifikationshæmmende effekt og for saltindhold. Indholdet af PAH-forbindelser var lavt og forhindrede ikke udledning til kloak som industrispildevand. Nitrifikationshæmningen var lav, men viste at nærmere undersøgelser var påkrævet. Saltindholdet gav ingen problemer i forbindelse med afledning, men viste også at man kunne recirkulere kondensat til forgasseren i adskillige år, før saltophobning kunne blive et problem.

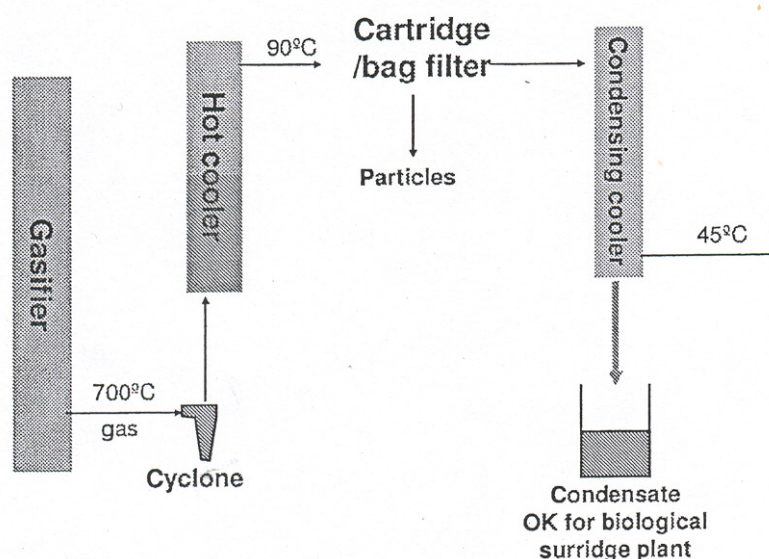
Sod fanget af filteret efter scrubberen blev tørret, og reaktivitet under forgasning blev sammenlignet med reaktiviteten af knust koks. Undersøgelsen blev udført i Makro-TGA udstyret og viste, at soden forgasses lige så hurtigt som koks. Dette betyder, at opsamlet sod fra filtre og lignende kan forgasses.

Forsøg med anvendelse af posefiltermateriale til gasrensning som alternativ til vådscrubning var prøvet tidligere med lovende resultat. Da gassens indhold af tjære nu var yderligere reduceret, blev det vurderet, at gassen uden problemer kunne køles ned til en temperatur lige over vanddugpunktet (omkring 60-80°C) og under

maximaltemperaturen for driften af simple og billige poser, Denne ligger omkring 130°C. Temperaturer omkring 90°C blev valgt, idet dette let kunne opnås med en termostateret vand-gas veksler.

Fordele ved et tørt gasrensesystem ville være et renere kondensatet, idet dette ikke ville komme i kontakt med partikler og de tjærestoffer, der sad herpå. Herudover ville tryktabet over et filter være lavere end over venturiscrubberen, hvilket ville resultere i lavere egetforbrug af energi.

Gasrensesystemet blev nu ændret. Først mødte den producerede gas cyklonen. Herefter den omtalte varmeveksler der kølede gassen ned til over vanddugpunktet. Herefter ledtes gassen til filteret. Dette filter kunne enten være et posefilter eller et patronfilter. Efter filteret ledtes gassen til en varmeveksler, hvor kondensatet udkondenseredes. For at undgå dråber i gassen ledes gassen videre til endnu et patronfilter, der fungerer som demistor. (Se figur 7.15).



Figur 7.15 (Fra ref. a-92, figur 2). Skitse af gasrensesystemet baseret på filtrering over vanddugpunktet og efterfølgende udkondensering af vand.

Resultaterne viste, at det godt kunne lade sig gøre at rense gassen med dette system baseret på filtre. Der blev afprøvet forskellige filtermaterialer (Se ref. a-71 og a-99). Tabel 7.4 viser forskellige filters effektivitet.

Det ses at patronfiltre er yderst effektive, og at posefiltre ligeledes er effektive. Samtidig vistes, at posefiltre lader sig rense med bagskylning med N<sub>2</sub> under drift.

Teoretisk stiger filtereffektiviteten, når gashastigheden gennem filteret falder. Under disse forsøg var hastigheden gennem posefiltrene 0,02 m/s og gennem patronfiltrene under det halve. Dette svarer til, hvad der anbefales af filterfabrikanterne.

Under forsøget med gasrensning blev forgasseren kørt med forskelligt flis og med forskellig vandtilsætning.

Det viste sig ved dette forsøg, at partikelindholdet i gassen afhang af vandtilsætningen til forgasseren. Ved forgasning med meget lav vanddamptilsætning målt et partikelindhold i gassen op til mellem 1000 og 1500 mg/Nm<sup>3</sup>, hvorimod ved såkaldt normal forgasning, hvor forholdet mellem tør biomasse og vanddamptilsætning var 1:1, var partikelkoncentrationen mellem 150 og 500 mg/Nm<sup>3</sup>.

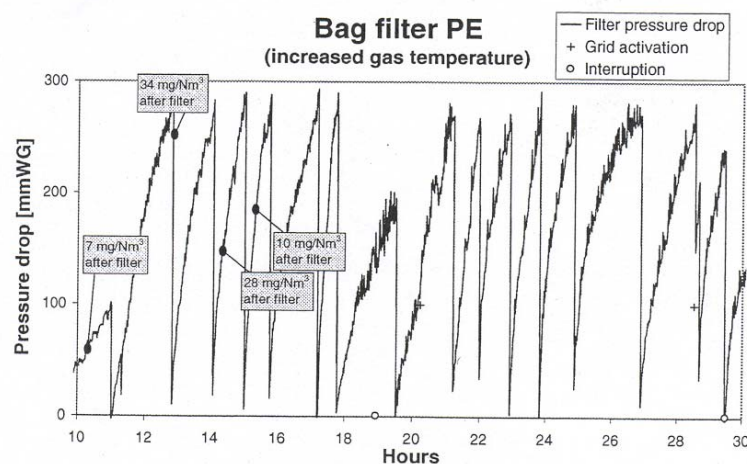
Filter type	Gasification mode	Gas velocity $U$ [m/s]	Before filter	Collected average	After filter	Efficiency	
			$c_{bf}$ [mg/Nm <sup>3</sup> ]	$c_{cm}$ [mg/Nm <sup>3</sup> ]	$c_{af}$ [mg/Nm <sup>3</sup> ]	$\eta_{bf}$ [%]	$\eta_{cm}$ [%]
Dralon-T†	Dry	0.021	1315	733	375†		
Dralon-T‡	Dry	0.021	1072	733	485‡		
PE/PE-501	Normal	0.021	384	489	7.5	98.0 %	98.5 %
PE/PE-501	Normal	0.021	384	489	34.0‡	91.1 %	93.5 %
PE/PE-501	Normal	0.021	384	489	27.6	92.8 %	94.7 %
PE/PE-501	Normal	0.021	384	489	10.4	97.3 %	97.9 %
PE/PE-501	Low pre-heat	0.021	894	890	39.9‡	95.5 %	95.7 %
PE/PE-501	Low pre-heat	0.021	398	890	13.6	96.6 %	98.5 %
Cartr. EN-13	Dry	0.010		1173	<1		100.0 %
Cartr. EN-247	Normal	0.004	131	451	2.1	98.4 %	99.5 %

Tabel 7.4 (Fra ref. a-71, tabel 2.4). Filtereffektiviteten for forskellige filtre vises. Gashastigheden gennem filteret vises også.

† Gasstrøm uden om filteret pga. fejlmontage.

‡ Under disse målinger bagskyllede posefiltret.

Ved forgasning under forhold med lav vandtilsætning og høj lufttilsætning pga. lille forvarmning af de tilførte massestrømme var partikelindholdet mellem 400 og 1000 mg/Nm<sup>3</sup>.



Figur 7.16 (Fra ref. a-99, figur 5). Forløb af tryktab over posefilter under forgasning. Det ses at bagskylning med N<sub>2</sub> under drift omgående reducerer tryktabet. Partikelindholdet i gassen før filtrering er ca. 450 mg/Nm<sup>3</sup>.

Det bedste posefilter viste sig at være EN/PE 501. Dette er et helt almindeligt stoffilter.

Rensning af dette posefiltret ved bagskylning med N<sub>2</sub> under drift fungerede godt. Efter 50 skylninger regenereredes filteret stadig fint. Intet tydede på, at partiklerne ville klistre til poserne eller på anden måde ødelægge det. (Se figur 7.16).

Patronfiltrene havde en betydeligt tryktabsstigning over tid. Efterfølgende rensning vurderedes at være mulig, men blev ikke undersøgt detaljeret.

Koksbedden gav anledning til en del overvejelser. Tryktabet steg i perioder voldsomt. Der blev observeret en klar sammenhæng mellem tryktabet og partikelindholdet i gassen. Dette kunne skyldes forskellige årsager, men at partiklerne tilstoppede koksbedden syntes oplagt.

Det blev vist, at gasrensningen kunne foregå med et posefilter over vanddugpunktet, og at kondensat i gassen efterfølgende kunne udkondenseres uden noget indhold af partikler. Kondensatet var rent nok til udledning til kloak.

Efter dette forsøg var det vist, at træflis kunne forgasses i en totrinsforgasser med høj energivirkningsgrad og ekstrem lav tjæreindhold i den producerede gas. Som træforgasser var totrinsforgasseren hermed demonstreret.

## **7.9 Halmforgasning igen**

Forgasning af halm kom atter på tale.

Forgasning af halm i fluidbedanlæg var eftervist dels ved forsøg hos Foster Wheeler og dels hos os med LT-CFB forgasseren (se afsnit 9.2.2), men disse forgassere producerede en gas med moderat eller højt tjæreindhold. For mindre anlæg er forskellige forgassere afprøvet på halm. Den eneste af disse, der gav et tilfredsstillende resultat var totrinsforgasseren på DTU. Her blev som tidligere beskrevet løst oprevet halm omsat til gas, der med succes blev anvendt i en gasmotor. Den anvendte pyrolysereaktor vurderedes vanskelig at skalere op, og dette ville kræve en betydelig teknologisk udviklingsindsats. (Se afsnit 7.5). Det blev vurderet, at det ville kræve en langt mindre indsats at tilpasse den eksisterende totrinsforgasser til at forgasse halm på briket- eller pilleform. Herved kunne halm håndteres i forgasseren. Som tidligere omtalt har halm den uheldige egenskab, at dens aske har lave smeltepunkter, og derfor let danner slagge. For at undgå dette besluttedes det at tilsætte antislaggemiddel til halmen.

Der blev aftalt samarbejde med Teknologisk Institut, Århus, der arbejdede med tilsvarende problemstillinger sigtende på forbrændingsanlæg. Herved kunne den samme halm med tilhørende analyser anvendes til undersøgelser ved såvel forbrænding som forgasning.

Undersøgelser af brikketering og pilletering blev iværksat. Undersøgelsen resulterede i at piller blev valgt. Dette skyldtes dels, at der var langt flere pilleteringsanlæg til rådighed, og dels at der var mest "fremtid" i piller.

Der blev ligeledes iværksat undersøgelser, der skulle finde et egnet additiv. Dette skal ses i sammenhæng med det arbejde, der er beskrevet i afsnit 8.4 om forgasning af koks.

Der blev på laboratoriet foretaget undersøgelser af den valgte halms sintringsegenskaber med og uden additiver. Med en enkeltpillepresse blev piller uden og med additiv i forskellig doseringer produceret. Disse pillers sintrings- og slaggedannelsesegenskaber blev herefter prøvet under forgasningsbetingelser i en Makro-TGA reaktor.

Der blev afprøvet to slags additiver. Det ene var kalk, det andet var fosforsyre blandet med brændt kalk (benævnt CAP) tilsat lidt kalk-melasse som bindemiddel.

Den anvendte halm havde et usædvanligt højt indhold af aske (8,5%). Askens indhold af silicium var ligeledes forholdsvis højt.

Forsøgene med pillerne, der var tilsat kalk, viste at asken efter forgasning var hård som en sten. Forsøgene med tilsætning af CAP i tilstrækkelige mængder gav derimod en aske, der var hel blød. Reaktiviteten af koksen var til gengæld halveret, men dette kunne accepteres.

Tilsvarende sintringstests blev gennemført for de additiver, der anvendtes ved forbrændingsforsøgene hos Teknologisk Institut. (Se ref. a- 103 og afsnit 8.6).

Det blev besluttet at anvende additivet CAP som antisintringsmiddel (Se ref. p-3 og p-4), og produktionen af to tons halmpiller gik i gang hos Bioteknologisk institut i Kolding.

Efter en del genvordigheder, hvor det bl.a. viste sig nødvendigt at tilsætte rapsolie som smøre- og bindemiddel, blev halmen til gode stabile piller.

Efterfølgende undersøgelser af disse pillers mekaniske egenskaber under tørring, pyrolyse og under forgasning gav positive resultater. Pillerne var mekanisk ret stabile. Undersøgelse af pillernes askeegenskaber viste også gode resultater, der helt var på linie med forundersøgelserne.

Inden forsøget med 100 kW forgasseren måtte denne ændres en del. Da askemængden i halmen var betragtelig, kunne denne ikke som ved træforgasning akkumuleres i bunden af forgasseren ret længe. Derfor blev der designet og bygget et askeudmadningsudstyr. Herudover blev foretaget enkelte ændringer i anlæggets styring.

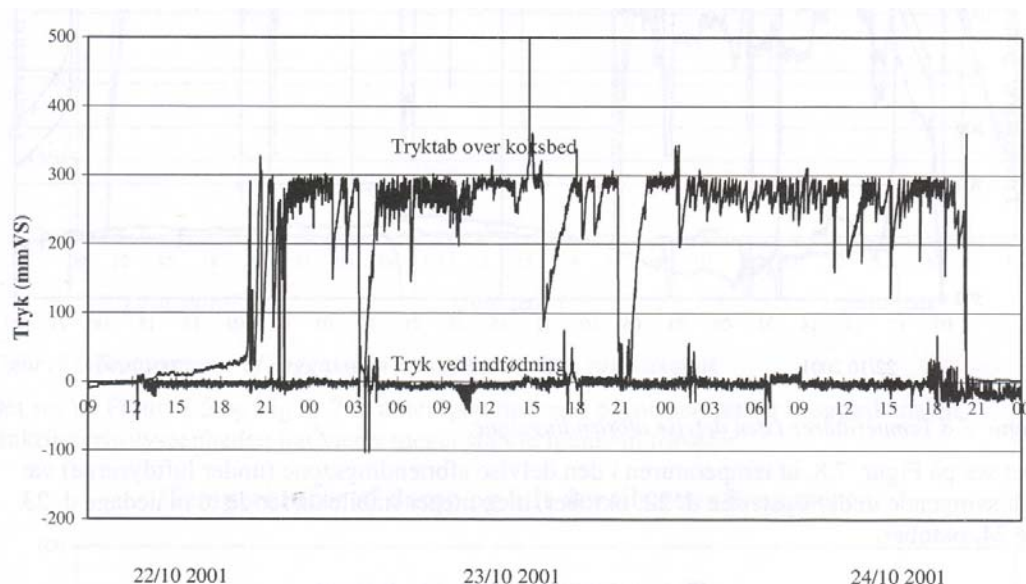
Pillernes fugtindhold før forgasningen var gennemsnitlig 10,9 %.

Forsøget med forgasning af halmpiller med additiv i 100 kW forgasseren kørte godt. Risten blev sat til automatisk aktivering når tryktabet over koksbedden oversteg 300 mm Vs.

Herved opnåedes at kokstabet i starten af forsøget var ret stort, men som tiden gik faldt dette. Omsætningsgraden af det materiale, der blev ført ud af askeudmaderen, var mod forsøgets slutning omkring 98%. Forsøget varede ca. 60 timer.

Koksbedden lå stabil uden tegn på gennembrænding eller lignende. Ristesystemet holdt tryktabet under 300 mmVS (Se figur 7.17) og bedhøjden var mellem 600-700 mm.

Der blev foretaget partikelmålinger efter forskellige metoder. Resultaterne kan sammenfattes til at partiklerne i gassen primært bestod af salmiak og kaliumklorid.



Figur 7.17 (Fra ref. a-103, figur 3.13). Forløb af tryktabet over koksbedden under forgasning af halmpiller i 100 kW forgasseren. Aktivering af risten holder tryktabet under set-punktet på 300 mm Vs.

Partikelmængden var ret stor (2-3 gram/Nm<sup>3</sup>). Indholdet af sod blev ikke målt, men det opsamlede materiale var hvidt eller lysegråt, så sodindholdet anslås at være ret begrænset.

Der blev med en kaskadeimpaktor forsøgt at lave partikelstørrelsesfordelingsmålinger. Dette blev besværliggjort af udkondensering af faststof. Elektronmikroskopi af de opsamlede partikler viste, at de var runde og havde størrelser omkring 0,5  $\mu$ m.

Tjæreindholdet i gassen blev målt af TI og DTU. TI anvendte Pedersen-metoden og DTU anvendte SPA-metoden. Der var god overensstemmelse mellem parallelle målinger. Tjæreindholdet lå på omkring 35 mg/Nm<sup>3</sup>. Heraf var de 34 mg /Nm<sup>3</sup> benzen. Benzenindholdet er en størrelsesorden højere end ved tidligere målinger af gas fra træ.

Tjæreindholdet er her lidt lavere end målt ved de første forsøg med halmforgasning i en tottrinsforgasser. (Se tabel 7.3).

Undersøgelse af asken som kom ud under drift, og af asken der blev fundet i koksreaktoren efter forsøget viste, at der ikke var tendens til sintring eller slaggedannelse.



Det kan konkluderes, at tottrinsforgasseren er velegnet til at forgasse halmpiller tilsat antislaggemiddel.

### **7.10 Viking forgasseren**

Der var opnået lovende resultater med 100 kW forgasseren efter, at denne blev optimeret ved anvendelse af træflis som brændsel. Også forsøget med halmpiller viste gode resultater. Det var imidlertid ikke tilstrækkeligt til at gøre industrivirksomheder interesseret i kommercialisering, og selv om dette nok hovedsageligt skyldtes de økonomiske og markeds-mæssige forhold, blev det vurderet, at også den teknologiske risiko havde en betydning. Det var også klart, at selv om 100 kW anlægget havde forgasset i sammenlagt 400-500 timer - delt op på mange forsøg - så ville der være en betydelig udviklings- og forskningsmæssig indsats, før et færdigt kommercielt produkt ville eksistere.

På denne baggrund blev det besluttet at bygge en lille forgasser på DTU. For at undgå alle de forskellige krav og interesser, der følger med et traditionelt eksternt finansieret projekt, blev det besluttet at anvende Halmfortets opsparede midler suppleret med midler fra UVE- ordningens opfølgingsprogram.

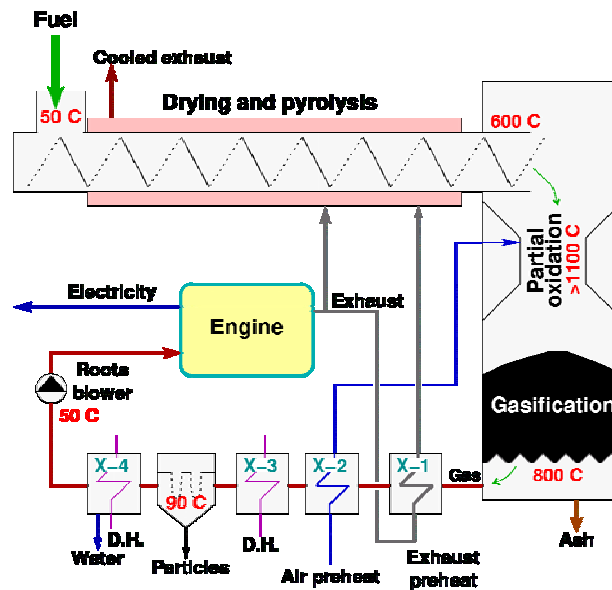


Figur 7.18 (Fra bilag 11, figur 1). Foto af facaden på forgasningsanlægget Viking.

Målet var i al sin enkelthed at bygge en tottrinsforgasser, der skulle forgasse træflis og køre fuldautomatisk og uovervåget. Anlægget skulle køre med indfødnings af brændsel i minimum 1000 timer.

For at præsentere sig bedst muligt blev der arbejdet en del med anlæggets udseende og komponenternes placering i forhold til hinanden. På figur 7.18 ses et foto af anlæggets front.

Det blev valgt at bygge anlægget som en traditionel tottrinsproces med eksternt opvarmet pyrolyseenhed. Procesdiagrammet ses på figur 7.19.



Figur 7.19 (Fra bilag 11, figur 2). Skitse af Viking forgasningsanlægget.

### 7.10.1 Anlægsbeskrivelse

Flissiloen blev indkøbt som en standardkomponent. Indfødningsystemet blev baseret på snegle og et slusesystem bestående af to spjæld.

Flisen kommer herefter ind i en doseringsenhed, hvor en snegl doserer flisen til pyrolyseenheden.

Brændslet ledes gennem pyrolyseenheden vha. en snegl. Når flisen således er tørret og pyrolyseret, falder koksen ned i koksforgasningsreaktoren.

De flygtige pyrolyseprodukter blandet med vanddampen fra tørringen af flisen møder den forvarmede luft, og den partielle oxidation finder sted. Produkterne strømmer ned og reagerer med koksen. Den herved producerede gas ledes ned gennem risten og videre ud i gassystemet.

Risten er en såkaldt Ole-rist der kan vippe fra side til side og derved lade materiale passere igennem. I bunden af forgasseren leder to snegle aske ud til en container.

Gassen passerer først en cyklon og ledes derefter til en varmeveksler, hvor 1/3 af motorens udstødningsgas forvarmes. Herefter ledes gassen gennem luftforvarmeren og videre til en termostateret køler, der køler gassen ned til ca. 90°C, hvilket er over gassens vanddugpunkt. Gassen ledes herefter til posefiltret gennem et patronfilter, der fungerer som sikkerhedsfilter og videre til den kondenserende køler, hvor kondensatet i gassen fjernes. Gassen strømmer herefter gennem endnu et patronfilter, der fungerer som demistor og fjerner vanddråber fra gassen. Gassen ledes herefter gennem gasblæseren, der er en volumetrisk maskine (Rootsblæser) gennem buffertanken og til



motoren. Buffertanken opblander gassen over ca. 5 minutter. Herved opnås en mere ensartet gassammensætning til motoren.

Ved motoren blandes gassen med luft i et T-stykke. Herefter opblandes luft og gas i et blandelegeme, hvorefter blandingen ledes til motorens indsugningsmanifold. Udstødningsgassen fra motoren deles, således at 1/3 opvarmes af produktgassen før den ledes til kappen af pyrolyseenheden i den varme ende. Denne del af udstødningsgassen blandes sammen med resten af udstødningsgassen, hvor dette ledes til pyrolyseenhedens kappe. Herved opnås bedre pyrolysering og højere energivirkningsgrad af hele anlægget. Dette design er baseret på modelberegninger.

Efter pyrolyseenheden køles udstødningsgassen ned i en varmeveksler, før det ledes til skorsten. Et vandsystem er tilknyttet forgasningsanlægget svarende til et fjernvarmeanlæg.

### **7.10.2 Styring**

Anlægget styres automatisk. Styresystemet er PLC baseret og bygger på samme grundprincip som 450 kW anlægget i Blære med en række drifttilstande.

Under drift er der flere muligheder for valg af styring. Enten kan luftindblæsningen holdes konstant, hvorefter gasstrømmen reguleres således at trykket i forgasseren ved indfødningsraten holdes på atmosfæretryk. Dette svarer til styringen af 100 kW anlægget og til dels også styringen af anlægget i Blære. Herudover er der mulighed for at holde gasproduktionen konstant. Lufttilsætningen reguleres i dette tilfælde således at trykket i forgasseren er atmosfæretryk.

Endelig er det muligt ved hjælp af en lambdasonde at regulere gasblæseren således, at iltkoncentrationen i motorens udstødningsgas holdes konstant. Lufttilsætningen reguleres samtidig, således at trykket i forgasseren holdes konstant.

Koksbeddens højde over risten registreres ved hjælp af temperaturmålinger i koksbeddens side. Indfødningsraten reguleres således at det tilstræbes at holde koksbeddhøjden konstant.

Risten aktiveres når tryktabet over koksbedden overstiger en indstillet værdi.

### **7.10.3 Resultater.**

Anlægget kører fuldautomatisk og der er opnået 2220 drifttimer.

Energivirkningsgraden fra brændværdi i træflisen til leveret elektricitet er målt til 25% (modelberegningerne viste 24%). Anlægget kører godt og stabilt.

De afprøvede reguleringsstrategier fungerer tilfredsstillende. Reguleringen af Indfødningsraten fungerer ligeledes tilfredsstillende.

Tryktabet over bedden har vist sig kun i få tilfælde at overstige den værdi, hvor risten aktiveres, i de tilfælde falder tryktabet som det skal som følge af ristens bevægelse. Imidlertid kræves flere bevægelser med risten for at få al aske ud. Dette er søgt løst ved også at aktivere risten på faste tidspunkter.

Det europæiske GAS-NET-samarbejde har ud af alle forgasningsprojekter i Europa udvalgt Vikingforgasseren sammen med 5 andre forgassere til at indgå i en publikation om succeshistorier inden for dette område.

En del af det flis, der er anvendt, stammer fra Junckers Industri i Køge. Flisen er affald fra guldproduktionen og træ til gulvproduktion bliver under oplagringen

overhældt med vand for at undgå revnedannelse. Hos Junckers anvendes havvand, og derfor er der i flisen observeret op til 25 gange mere natrium og klor end forventet. Dette har ført til belægninger i forskellige varmevekslere mm. af salte og karbonater. Imidlertid kan disse belægninger let fjernes ved skylning med vand.

Tjæreindholdet i rågassen er målt af Teknologisk Institut, Århus, Stuttgart Universitet og DTU. Alle målinger viste under 0,1 mg/Nm<sup>3</sup> gas. Dette er over al forventning.

Korrosionsmæssige undersøgelser har vist, at metaldelene (253 MA) i koksbedden ikke var påvirket. Materialerne i toppen af forgasseren består af murværk. Efter omkring 2000 timers drift blev det vurderet til at have mange tusind timers levetid endnu, men små mængder indtrængt alkalimetall i overfladen antydede at bedre materialer fandtes. Fire forskellige murværksmaterialer er nu under afprøvning.

Lastændring kan foregå hurtigt, og virkningsgraden ved dellast var god.

Alt i alt må det siges at resultaterne er meget vellykkede.

Et samarbejdsprojekt mellem DTU og to danske virksomheder sigter på at opskalere Viking-teknologien til kommerciel størrelse.

### **7.11 Hvirvelstrømsforgasseren**

Under forsøgene i Blære med 450 kW forgasseren blev der gjort en interessant opdagelse. I koksforgasserens ene side var monteret et skråtstillet skueglas. Gennem dette kunne man se overfladen af koksbedden, og man kunne se når pyrolyserede flisstykker faldt ned på overfladen af koksbedden.

Under et forsøg hvor der blev anvendt meget våd flis, observerede man, at der faldt ikke-pyrolyserede flisstykker ned på overfladen af koksbedden. Efter en tid, hvor stykkerne tørrede færdigt, ændredes deres farve fra træfarvet til sort, idet stykkerne pyrolyserede. Efter lidt længere tid blev stykkerne røde som resten af koksbedoverfladen.

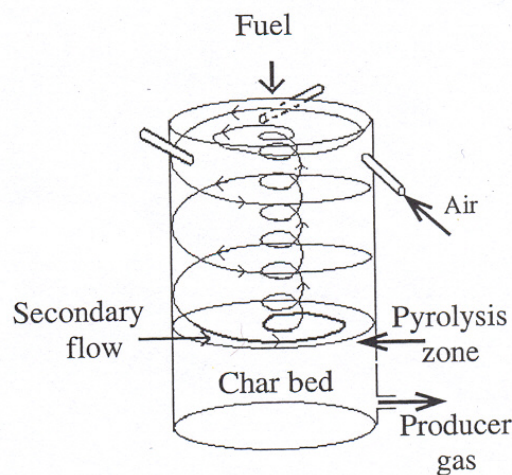
Man kunne nu forvente at tjæreindholdet i den producerede gas ville stige, men det var der ikke tegn på. Nærmere iagttagelser viste at røg steg op fra flisstykkerne, medens de pyrolyserede. Dette undrede, idet gasstrømningen i koksreaktorens fribord forventedes at være i nedadgående retning.

Nærmere eftertanke førte til, at der måtte være tale om sekundærstrømninger forårsaget af den roterende hvirvel, der dannes på grund af at luftindblæsningen har tangentielle hastighedskomponenter. Fænomenet kan illustreres ved at se teblade samle sig i midten ved bunden af en tekop, når teen røres rundt.

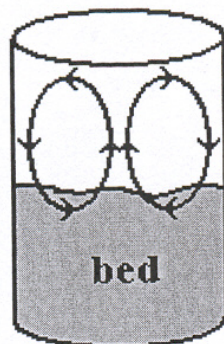
Pyrolysegasserne vil derfor i det øverste lag af koksbedden danne strømninger ind mod midten, op langs midteraksen og ud til siden, hvor luften tilsættes, og den partielle oxidation finder sted. Herefter vil de partielle oxiderede pyrolyseprodukter strømme ned langs reaktorvæggen og videre ned gennem koksbedden. Der vil være mulighed for, at nogle pyrolyseprodukter strømmer direkte ned gennem koksbedden uden først at have været udsat for partiel oxidation og forårsage tjære i gassen, men dette vil afhænge af hvirvlens styrke. (Se figur 7.20 og 7.21).

Efter nogle år blev det i forbindelse med eksamensprojektet ref. b-7 besluttet at undersøge hvirvelstrømsprincippet, som processen blev kaldt. I forbindelse med forsøgene med den optimerede 100 kW forgasser blev driftbetingelserne ændret, så de svarede til forholdene i en hvirvelstrømsforgasser. Varmetilførslen til pyrolyseenheden blev slukket, således at flis blev tilsat direkte til forgasserens top. Herved faldt der frisk flis ned på toppen af koksbedden. Gennem et skueglas i toppen af forgasseren kunne dette ses (Se ref. a-97).

Flisen pyrolyserede og de flygtige bestanddele blev hvirvlet op i fribordet, hvor den partielle oxidation fandt sted.



Figur 7.20 (Fra ref. a-97, figur 3). Principskitse af strømningsmønsteret i Hvirvelstrømsforgasseren.



Figur 7.21 (Fra ref. a-97, figur 4). Strømningsmønsteret i Hvirvelstrømsforgasseren.

I starten af denne drifttilstand kunne der observeres kanaldannelse i den ene side af koksbedden. Det vurderedes, at dette skyldes at luft nåede ned til koksen, hvilket kun kunne ske, hvis der ikke var pyrolysegasser nok til at reagere med luften oppe i fribordet, hvilket tydede på, at hvirveldannelsen var for svag. Der blev herefter lukket for vanddamptilsætningen hvis massestrøm havde været tæt på den tilførte

massestrøm af biomasse. Herved mindskes den masse, der skulle hvirvles rundt, og dette havde den ønskede effekt. Koksbedden blev nu fin og stabil. Forgasseren kørte herefter fint i 3 timer, hvorefter den planmæssigt blev stoppet. Målinger med SPA metoden viste, at tjæreindholdet i den producerede gas var lidt højere end ved traditionel tottrinsforgasning nemlig knap 100 mg/Nm<sup>3</sup> gas. En del af denne stigning skyldtes en forøgelse af indholdet af benzen.

I ref. b-6 ses yderligere resultater, og i afsnit om generelle emner ses undersøgelse af pyrolyse af træflis, der kastes ned i en varm reaktor.

Hvirvelstrømsforgasningsprocessen blev patentanmeldt (Se ref. p-1).

Efterfølgende blev en Hvirvelstrømsforgasser i forbindelse med et andet eksamensprojekt (Se ref. b-19) bygget. Denne var ret simpel i sin konstruktion. F.eks. var luftdyserne simple, idet de bestod af tre dyser med hver et hul.

Eksperimenter viste, at træflis kunne forgasses i denne forgasser, og at hvirvlen så fin ud. Målinger af tjæreindholdet i gassen viste imidlertid, at der var en størrelsesorden mere tjære i denne gas end ved hvirvelstrømsforsøget udført i 100 kW forgasseren. Dette kan skyldes forskellige ting, men at luftdyserne kunne være en årsag er ret sandsynlig.

Det er således vist, at hvirvelstrømsforgasseren med sin simple konstruktion kan forgasse træflis, og at det i et forsøg er opnået lave tjæreindhold i den producerede gas. Hvirvelstrømsforgasseren kræver yderligere udvikling.

## **7.12 Fluidbedteknologi til tottrinsforgasning**

Totrinsprocessen har som beskrevet tidligere en række væsentlige fordele frem for de fleste andre forgasningsprocesser. De væsentligste er det lave tjæreindhold i den producerede gas og den høje energivirkningsgrad. Totrinsprocessen er demonstreret i forbindelse med fixedbedteknologi. Denne teknologi indebærer begrænsninger ved store anlæg, idet det vurderes at være billigere at udføre store anlæg som fluidbedanlæg. Her tænkes primært på anlæg på 50-100 MW, men også for mindre anlæg kan det tænkes, at fluidbedbaseret teknologi er fordelagtig.

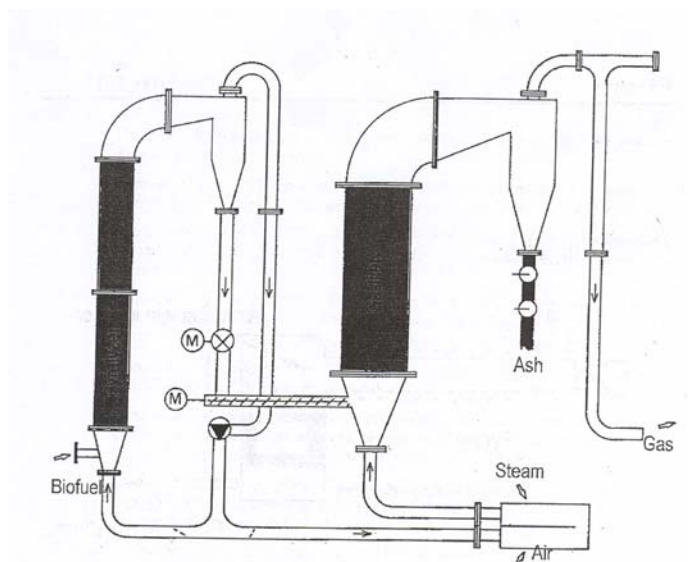
På denne baggrund blev der som et eksamensprojekt startet aktiviteter, der sigtede på at implementere tottrinsprocessen ved hjælp af fluidbedteknologi (Se ref. b-1).

Anlægget bestod af to fluidbedreaktorer, en pyrolyseenhed og en forgasser.

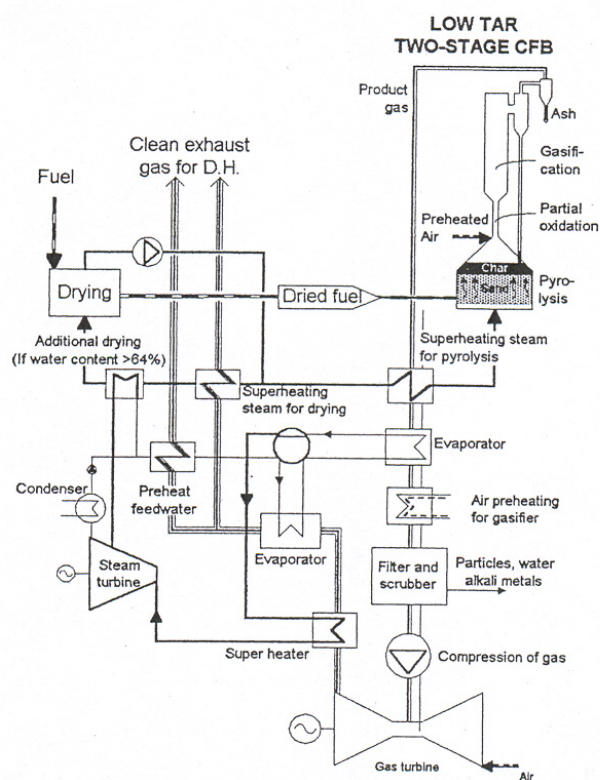
Pyrolyseenheden var tænkt eksternt opvarmet og fluidiseret med cirkulerende pyrolysegasser. (Se figur 7.22).

Et pilotanlæg på ca. 50 kW(termisk) blev bygget, og funktionen blev demonstreret i et enkelt forsøg. (Se ref. a-41 og a-50).

Imidlertid blev det vurderet, at fluidiseringen af pyrolyseenheden med cirkuleret pyrolysegas var vanskeligt at anvende i praksis.



Figur 7.22 (Fra ref. a-41, figur 2). Skitse af fluidbedforgasser baseret på tottrinsprocessen.



Figur 7.23 (Fra ref. a-67, figur 7). Procesdiagram af stor fluidbedbaseret tottrinsforgasser med combined cycle.

Senere er der som et samarbejde mellem Biomasseforgasningsgruppen, COWI og Vølund startet et projekt med samme formål, men hvor en lidt anden teknologi tænkes anvendt. (Se ref. a-67, a-73, a-100 og b-22). På figur 7.23 ses procesdiagrammet. Pyrolyseenheden består af en boblende fluidbedreaktor, hvor varmetilførslen sker ved hjælp af overhedet vanddamp fra tørreenheden. Overhedningen skyldes varmeveksling med den varme gas. Den delvise afbrænding finder sted i et separat kammer og forgasningen i en cirkulerende fluidbed reaktor. Anlægget fik navnet LT-BIG. Et simpelt 100 kW pilotanlæg er bygget, og processen er delvis verificeret. Der er indsendt patentansøgning (Se ref. p-2).

## **8. Generelle emner**

I dette afsnit behandles de aktiviteter, der har en generel eller grundlæggende forskningsmæssig karakter.

En del emner, der også kan betegnes som generelle eller grundlæggende, er beskrevet under de tidligere afsnit, f.eks. vedrørende gasrensning.

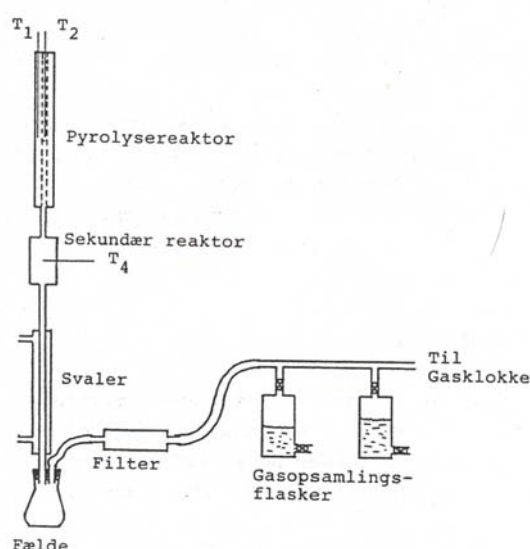
Der er sidst i dette afsnit søgt at beskrive relationer mellem de generelle undersøgelser og teknologiuudvikling eller modellering.

### **8.1 Masse- og energibalance ved pyrolyse af halm**

Der er gennemført eksperimentelle undersøgelser, der for en udvalgt halm viser, hvordan masse og energi fordeler sig i pyrolyseprodukter ved langsom pyrolyse af forholdsvis store halmprøver. I bilag 1 og bilag 2 er dette beskrevet detaljeret. (Se også ref. a-5 og a-49).

Forsøgsudstyret bestod af en pyrolysereaktor, et sekundært kammer til efterbehandling af de flygtige pyrolyseprodukter samt udstyr til opsamling af de flygtige bestanddele. Gassen kunne opsamles i 10 forskellige flasker, alt efter ved hvilken pyrolysetemperatur den var dannet.

Den sekundære reaktor blev anvendt til at undersøge effekten ved en opvarmning af de flygtige bestanddele. Dette er interessant, idet det ofte vil ske i kontinuert virkende anlæg. Endvidere kunne dette kammer fyldes med dolomit, og ved 900 °C bevirkede dette at praktisk talt al tjære blev nedbrudt til gas. Herved kunne grundstofafgivelsen (C, H, O) ved pyrolyse studeres alene ved hjælp af gasanalyse. Gasanalyser blev foretaget med en gaschromatograf. Forsøgsopstillingen vises på figur 8.1.



Figur 8.1 (Fra bilag 1, figur 1.1). Opstilling til undersøgelse af pyrolyseprodukter fra halm.

Massebalance ved pyrolyse ses i tabel 8.1.

Forsøgsserie	b				c			
Forsøg nr.	1b	2b	3b	4b	1c	2c	3c	4c
Temp.sek. reaktor °C	-	600	900	900 D	-	600	900	900 D
Halm %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Koks %	30,3	31,3	29,9	29,9	30,0	30,2	30,0	29,7
Kondensat %	45,8	39,0	25,8	13,4	46,3	40,3	25,8	13,7
Gas %	23,9	29,7	44,3	56,7	23,7	29,5	44,2	56,6

Tabel 8.1 (Fra bilag 1, tabel 1.1). Massefordelingen af pyrolyseprodukter under pyrolyse udregnet som procent af den oprindelige tørrede halmprøve. D angiver dolomit i sekundær reaktoren.

Effekten af den sekundære reaktors opvarmning af de flygtige pyrolyseprodukter ses. I tabel 8.2 ses fordelingen af energiindhold (brændværdi).

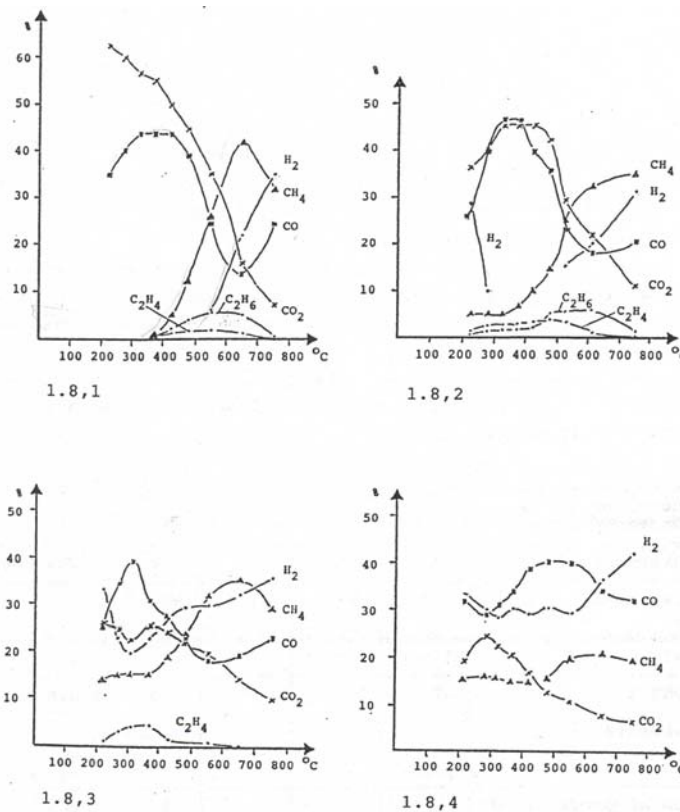
Energifordeling Forsøgsserie c.					
Forsøg nr.	1c	2c	3c	4c	usikkerhed
Temp. sek. reaktor °C	-	600	900	900 D	
Halm %	100,0	100,0	100,0	100,0	± 1
Koks %	43,7	43,7	43,7	43,3	± 0,6
Kondensat %	-	-	-	0,5	
Gas %	16,0	20,7	37,6	54,4	± 0,6-2,3
Sum af produkter %	-	-	-	98,2	± 2,9

Tabel 8.2 (Fra bilag 1, tabel 1.5). Energifordelingen af pyrolyseprodukter udregnet som procent af energiindholdet i den oprindelige tørrede halmprøve. Basis er øvre brændværdi. D angiver dolomitfyldning i sekundær reaktoren.

Endelig på figur 8.2 ses gassammensætningen i den producerede gas som funktion af pyrolysetemperaturen ved forskellige efterbehandlinger af gassen.



Tilsvarende undersøgelse af træ er ikke kendt.



Figur 8.2 (Fra bilag 1, figur 1.8). Gassammensætningen som funktion af temperaturen i pyrolysereaktoren.

- 1.8,1 Uden sekundær reaktor
- 1.8,2 Sekundær reaktor 600 °C
- 1.8,3 Sekundær reaktor 900 °C
- 1.8,4 Sekundær reaktor 900 °C og fyldt med dolomit

Energien, der medgår til pyrolyse og opvarmning af pyrolyseprodukterne til en given temperatur, er vigtig at kende ved design af anlæg, hvori pyrolyse indgår.

Der er opbygget forskellige modeller, der beskriver dette. Nogle er baseret på målinger (Se bilag 1, ref. c-4 og ref. b-7) andre på kombinationer af eksperimenter og beregninger, og nogle er baseret på forsimplede antagelser af pyrolyseprodukternes sammensætning og Jobaks gruppebidragsmetode. (Se ref. b-7). De forskellige metoder viser, at hvis biomasse opvarmes til 600 °C kræves hertil en energimængde svarende til mellem 4 og 7 % af biomassens brændværdi.

Mindre detaljerede undersøgelser af pyrolyse af træ er gennemført. (Se ref. b-10 og b-7).

Resultaterne af ovennævnte undersøgelser er anvendelige, og er anvendt ved dimensionering af pyrolyseanlæg og forgasningsanlæg (f.eks. pyrolyseanlægget i Haslev, Totrinsforgassere i Blære og på DTU samt i videnskabelig sammenhæng.).

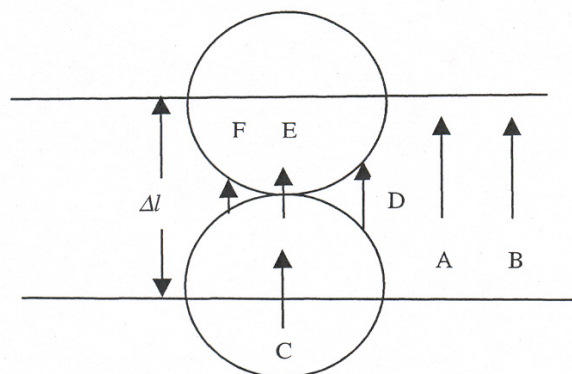
## 8.2 Varmetransport i biomasse og biomassekoks

I forbindelse med dimensionering af pyrolyseenheder, forgassere og forbrændingsanlæg er det af stor vigtighed at kende forhold vedrørende varmetransport i reaktorer fyldt med biomasse eller biomassekoks.

Der er foretaget undersøgelser af varmetransmission i løs halm under pyrolyse. (Se ref. a-7 og a-11). Det fremgår, at de flygtige pyrolyseprodukters strømning giver et væsentligt bidrag til varmetransporten. Samtidig ses, at såvel temperaturen som halmens tæthed har en indflydelse.

Efterfølgende er ikke-konvektiv varmetransmission i koks af halm og træflis undersøgt (Se ref. a-24 og a-31). Der er opbygget et forsøgsapparat baseret på standarden ASTM C 201-93 modificeret til at kunne måle på brændbare materialer. Apparatet, der er kalibreret vha. måling på et kendt isoleringsmateriale, anvendes til måling af den tilsyneladende varmeledningsevne for en prøve af koks fra halm og træflis ved temperaturer mellem 20 og 1000 °C.

Teoretiske modeller til beskrivelse af varmetransporten er opstillet. Det har vist sig, at en model beskrevet af Yagi og Kunii (Se figur 8.3) giver god overensstemmelse med eksperimenterne, hvis såvel porøsitet som en karakteristisk afstand mellem partikler kendes eller tilpasses.



- |                                      |                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| A: Conduction through voids          | B: Radiation through voids       |
| C: Conduction through solids         | D: Radiation between particles   |
| E: Conduction through contact points | F: Conduction through fluid film |

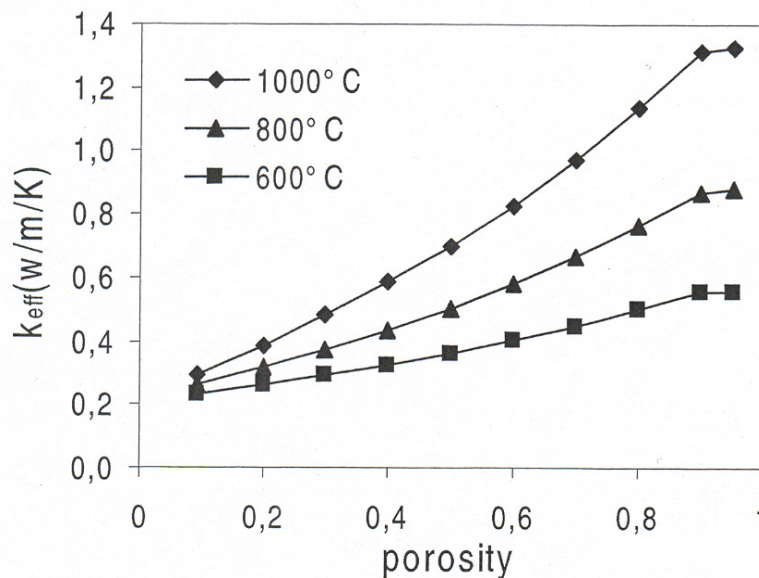
Figur 8.3 (Fra ref. a-101, figur 3). Skitse af varmeoverføringsmekanismerne i en partikelbed ifølge Yagi og Kunii.

Modellerne viser, at hovedparten af varmetransporten skyldes stråling selv ved moderate temperaturer.

Modellen blev udvidet til at medtage effekten af en gasstrøm vinkelret på varmetransportretningen. (Se ref. c-5).

Et problem ved anvendelse af modellen er, at de to parametre, der beskriver pakningen af bedden dvs. bedporøsiteten og den karakteristiske længde mellem partiklerne, skal kendes hver for sig. Disse parametre ændres, når halmen bliver løsnet op osv. En væsentlig forbedring ville være kun at skulle karakterisere bedden med en af disse parameter f.eks. bedporøsiteten. Med dette formål er modellen udvidet, således at sammenhængen mellem disse parametre udregnes bl.a. ved brug af en karakteristisk strådiameter. Resultaterne af den udvidede model giver god overensstemmelse med målinger. (Se bilag 10 og ref. a-101).

Det fremgår at varmeledningsevnen stiger ved voksende temperatur, voksende porøsitet af bed, øget partikeldiameter og øget gasflow vinkelret på varmeledningsretningen. En del af dette arbejde er gennemført i samarbejde med CHEC -gruppen på Institut for Kemiteknik, DTU, sigtende på modellering af ristefyringsanlæg. (Se figur 8.4 og 8.5).



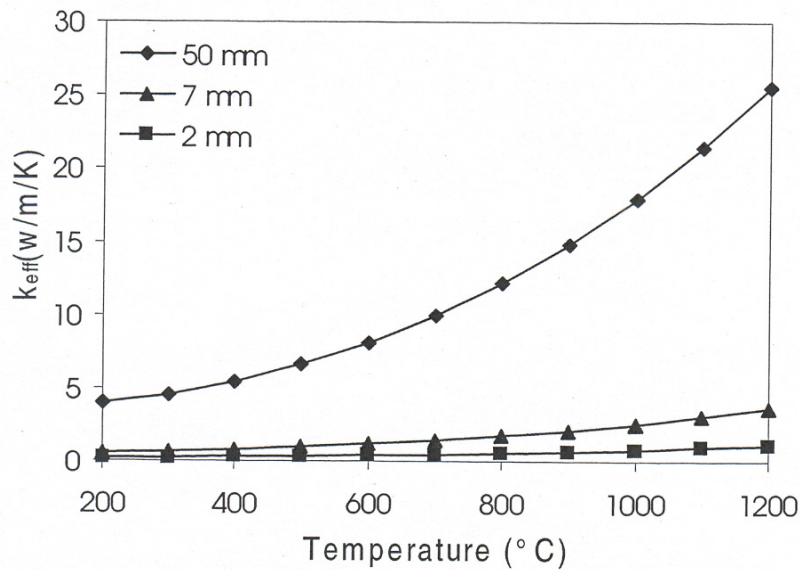
Figur 8.4 (Fra ref. a-101, figur 14). Varmeledningsevne for en partikelbed, med 2 mm partikler, som funktion af porøsiteten, ved tre forskellige temperaturer ( 600, 800 og 900 °C). Gasmassefluxen vinkelret på varmeledningsretningen er 0,12 kg/s m<sup>2</sup>.

Der er gennemført målinger af varmetransport i halm under pyrolyse i en eksternt opvarmet sneglebaseret kontinuert virkende pyrolyseenhed. (Se ref. c-4 og ref. b-4).

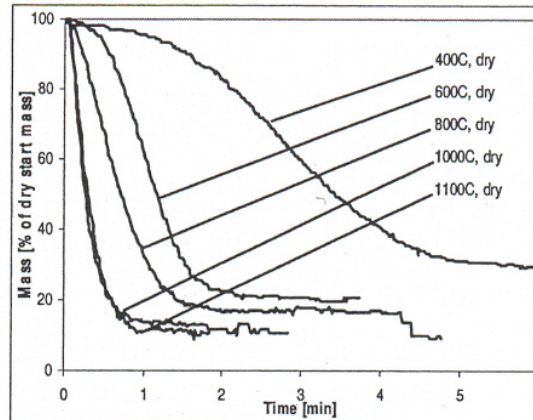
Tilsvarende er teoretiske betragtninger opstillet i denne sammenhæng. Et overraskende resultat var, at en væsentlig varmetransport fra reaktorbæggen til halmen sker gennem sneglevindingerne.

Opvarmning af flispartikler nedkastet i en varm reaktor er undersøgt i ref. b-7, a-97 og b-10. Det vises, at opvarmningen afhænger af såvel varmetransport til partiklens overflade, varmetransport ind gennem partiklen, og kinetiske begrænsninger ved pyrolyseprocesserne. (Se figur 8.6).

Det har vist sig, at den ikke-konvektive varmetransport i fixedbed koksfor-gassere ikke spiller nogen væsentlig rolle.



Figur 8.5 (Fra ref. a-101, figur 17). Varmeledningsevne for en partikelbed som funktion af temperaturen for 2, 7 og 50 mm partikler. Porøsiteten er 0,58 og gasmassefluxen vinkelret på varmeledningsretningen er 0,12 kg/s m<sup>2</sup>.



Figur 8.6 (Fra ref. a-97, figur 9). Massetabet af tør træflis under pyrolyse efter nedkastning i forvarmet reaktor ved forskellige temperaturer.

Resultaterne anvendes ved modellering og dimensionering af pyrolyseenheder og risteforbrændingsanlæg.

### 8.3 Tjæredekomponering

Et af de helt store problemer med forgasning er indhold af tjære i den producerede gas. (Se bilag 1, ref. a-1, a-5, a-49 og a-81).

Måling af tjæreindholdet i gas anses for at være vanskeligt. Ved nedkøling af gassen til under tjærestoffernes dugpunkt kan tjærestoffer let danne aerosoler, der ikke afsættes i svalere, opsamles i fælder eller lignende. Kun filtre, f.eks. twistfiltre, eller for den sags skyld elektrofiltre som anvendt i gasrens anlægget i Harbøreforgaseren, kan fjerne disse aerosoler fra gassen.

Ved tjæremålinger er derfor anvendt forskellige kombinationer af svalere, filtre (twist og XRD filtre) til at fange tjæren i gassen. Forskellige analysemetoder er anvendt til at bestemme mængden af den opsamlede tjære og opdele den i forskellige fraktioner. Det er vist, at de anvendte opløsningsmidler ikke er uden betydning. (Se ref. a-65).

Der er i de senere år arbejdet sammen med Teknologisk Institut i Århus (TI) vedrørende udvikling af tjæremålingsmetoder og tjæremåling. Dette bl.a. i forbindelse med TI's deltagelse i et EU-projektet om standardisering af tjæremålemetoder. Herudover anvendes den meget prisbillige svensk udviklede SPA-metode.

Tjæremåling behandles i bilag 1 samt referencerne a-5, a- 49, a-65 og a-81.

I undersøgelser fra før tottrinsforgasserens tid blev dolomit testet som tjæredekomponerende katalysator. Dette var ret effektivt ved temperaturer over 900 °C, men visse problemer med tilstopning og håndtering viste sig. Dette svarer til erfaringer rapporteret i litteraturen.

Med tottrinsforgasningsprocessen blev det vist muligt at forgasse biomasse til en praktisk talt tjærefri gas uden brug af katalysator eller lignende. Det blev besluttet at foretage nærmere undersøgelse af de processer i tottrinsforgasningen hvor tjærereduktionen fandt sted. Målet med at opnå en bedre forståelse af tjærereduktionen var dels en optimering af tottrinsforgasningsprocessen og dels forhåbning om anvendelse af denne viden også ved andre forgasningsprocesser.

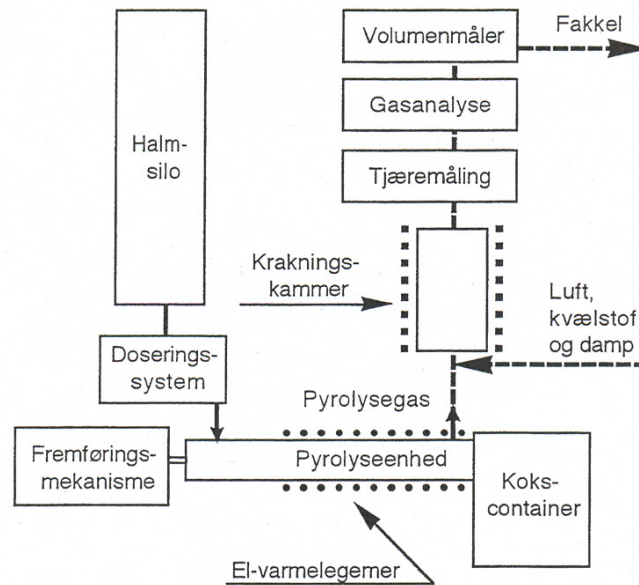
Der er foretaget studier af tjæredekomponeringen under den partielle oxidation. Dette blev gjort i tottrinsforgassere og i separate opstillinger. (Se ref. a-35, a-48, a-49).

En separat kontinuert virkende opstilling blev konstrueret. Opstillingen bestod af en ekstern opvarmet pyrolyseenhed med opsamling af koks. De flygtige pyrolyseprodukter blev ledt til en partiel oxidationsreaktor, hvor forvarmet luft og vanddamp blev tilsat. Temperaturen i dette kammer blev reguleret stort set uafhængigt af den tilsatte luftmængde. (Se figur 8.7).

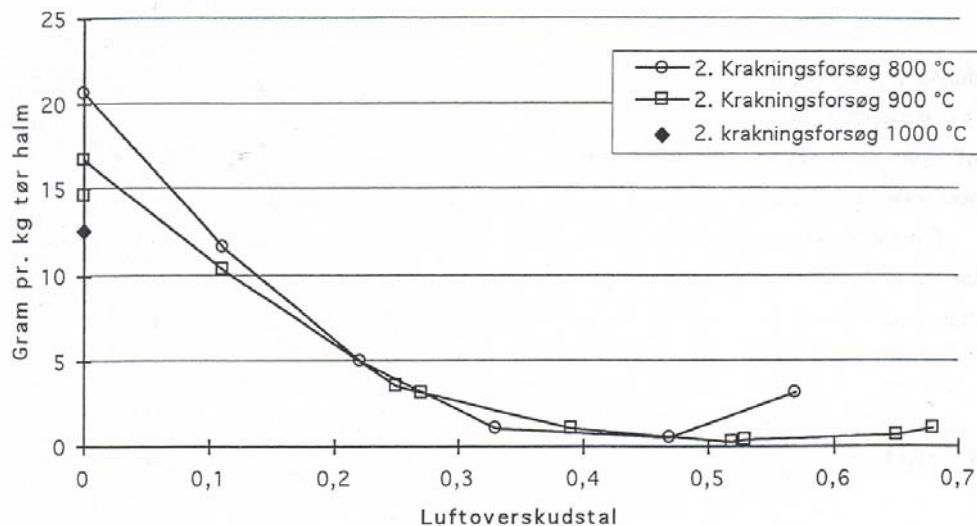
Det blev vist at ved partiel oxidation reduceres tjæreindholdet. Reduktionen steg med stigende luftoverskudstal indtil dette var ca. 0,3. Luftoverskudstallet regnes i forhold til støkiometrisk afbrænding af alle flygtige bestanddele. (Se figur 8.8).

Den høje reduktion af tjære skyldes formodentlig tjærestoffernes relativt høje kemiske affinitet til ilt sammenlignet med de øvrige brændbare bestanddele i de flygtige pyrolyseprodukter. Det blev vist at partiel oxidation er effektiv ved temperaturer på 800 og 900 °C. Tjærereduktioner med op til en faktor 100 blev opnået.

I bilag 8 ses at udover tjærenedbrydningen under partiel oxidation sker også en væsentlig tjærenedbrydning ved tjærens passage gennem koksbedden.



Figur 8.7 (Fra ref. a-49, figur 1). Principskitse af opstilling til at undersøge partiel oxidation.



Figur 8.8 (Fra ref. a-49, diagram 11). Tjæreindholdet i den producerede gas som funktion af tilsat luft ved tre forskellige temperaturer i kammeret, hvor den partielle oxidation finder sted.

Tjærereduktionen her er størrelsesordensmæssigt en faktor 100. Der sker en forholdsvis højere reduktion af tunge tjæremolekyler.



Kombinationen af partiel oxidation og passage gennem en koksbed giver en effektiv tjærenedbrydning. PAH ses ikke i den producerede gas.

Efter publicering af disse resultater er der i den videnskabelige litteratur set interesse for tjærenedbrydningen internt i forgassere. (se f.eks. ref. c-9) .

Det er ved optimering af tottrinsforgasseren vist, at god opblanding af luft i de flygtige pyrolyseprodukter har betydning for effektiviteten af den partielle oxidation. Tilsvarende er det vist, at det er nødvendigt at næsten 100 % af de partielle oxiderede produkter passerer gennem koksbedden for at opnå et tilfredsstillende lavt tjæreindhold i den producerede gas.

Der er gennemført undersøgelser af termisk dekomponering af tjære i forgasningsgas og pyrolysegas. Ved termisk dekomponering sker udelukkende en opvarmning af gasserne. Det er vist, at for pyrolysegas og for gas fra en modstrømsforgasser skal gasserne opvarmes til næsten 1300 °C for at reducere gassens tjæreindhold til et acceptabelt lavt niveau.

I tilknytning hertil er der foretaget undersøgelser af forskellige varmevekslingssystemer, der ville kunne anvendes til opvarmning af forgasningsgas til denne temperatur. Et system, hvor gassen veksler med sig selv, er undersøgt, men ikke afprøvet på forgasningsgas.

#### **8. 4 Forgasning af koks**

Ved arbejde med koksforgasningsreaktorer i forgasningsanlæg er det vigtigt at have kendskab til koksens omsætningshastighed under forgasningsbetingelser.

Koks dannes ved pyrolyse og består hovedsagelig af kulstof og uorganiske bestanddele, men indeholder ofte mindre mængder af ilt og brint. (Se ref. b-16, a-74 og a-75).

Når koksen forgasses, reagerer kulstoffet med et forgasningsmiddel f.eks. vanddamp, CO<sub>2</sub> , O<sub>2</sub> eller blandinger heraf. Den producerede gas vil bestå af CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> og N<sub>2</sub>.

Omsætningshastigheden for et stykke koks afhænger dels af den kemiske kinetiske reaktivitet, men også af Energi- og massetransport.

Reaktiviteten afhænger af forskellige faktorer. De mest betydende er temperaturen og sammensætningen af den omgivne gas, men også de uorganiske bestanddele i koksen har stor betydning. Reaktiviteten ændres med koksens omsætningsgrad.

Energitransporten til en kokspartikels overflade og videre ind gennem materialet er en begrænsende faktor for omsætningshastigheden for endoterme processer.

Massetransporten af forgasningsmiddel til partiklen og videre ind gennem partiklens porestruktur er også en begrænsende faktor.

##### **8. 4. 1 Mikro-TGA undersøgelser**

Ved hjælp af mikro-TGA udstyr foretages undersøgelser af den kemiske kinetik af koks. Dette er gjort for bøgetræ. (Se ref. b-16).

Der er foretaget undersøgelse af reaktivitetens afhængighed af temperatur sammensætning af den omgivne gas og omsætningsgraden. Det anvendte TGA udstyr kan som et af de få i verden anvende vanddamp som forgasningsmiddel.

Ved målingerne anvendes meget små prøver (ca. 5 mg), og masse og energitransport har ringe indflydelse på måleresultaterne.

Måleresultaterne er anvendt til at bestemme parametrene i et Langmuir Hinshelwood udtryk, og der opnås med dette udtryk en god beskrivelse af den kemiske kinetik.

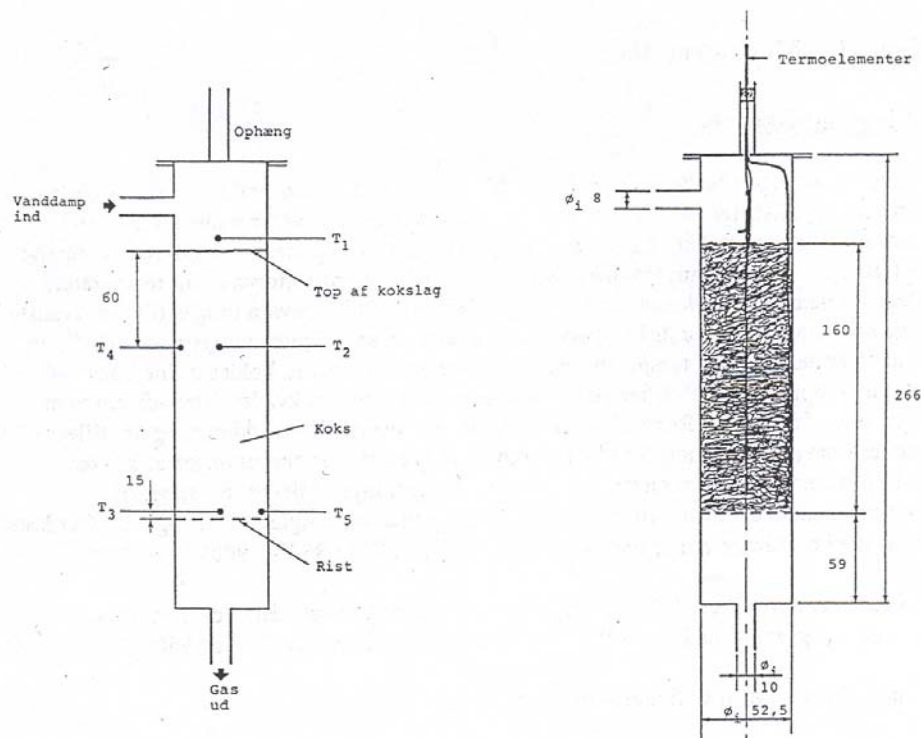
Reaktivitetens afhængighed af omsætningsgraden beskrives ofte som en profil, der multipliceres på kinetikudtrykket. Denne metode er anvendt her.

For halm findes ikke tilsvarende målinger.

#### **8.4.2 Makro-TGA undersøgelser.**

For også at studere masse og energitransport i koks under forgasning er konstrueret et Makro- TGA udstyr. (Se bilag 6 og figur 8.9 og 8.10 samt ref. a-15, a-16, a-17, a-20, a- 46). Prøvestørrelsen er her mellem 5 og 25 gram.

Her kan den reelle omsætningshastighed (den tilsyneladende reaktivitet) måles. Der er gennemført målinger af omsætningshastigheden for en række brændsler f.eks. forskellige halmtyper, træflis og brændelspillen.

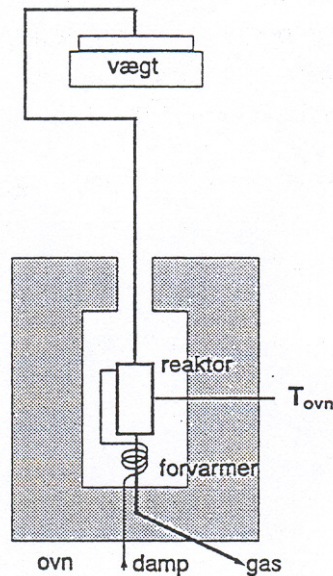


Figur 8.9 (Fra bilag 6, figur 1.1). Skitse af Makro-TGA reaktoren fyldt med halmkoks.

Disse data er bl.a. anvendt til at verificere matematiske modeller, der beskriver omsætningshastigheden af halm i Makro-TGA reaktoren. Dette gøres ved hjælp af masse- og energibalance, kemisk ligevægt i gasserne efter Watergasshift og udtryk for varmetransport. I mangel af bedre er der opstillet et delvist empirisk

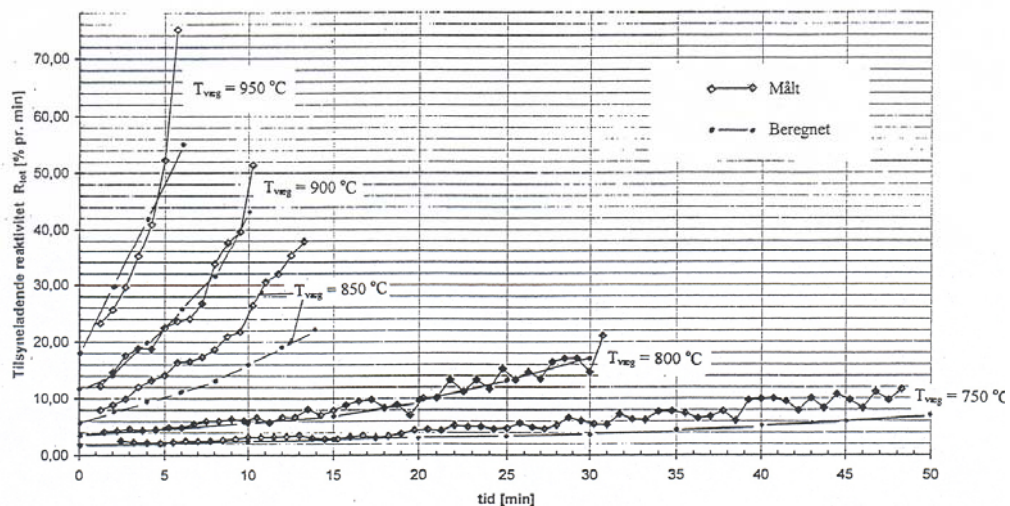


reaktivitetsudtryk, der tager hensyn til temperatur, vanddampkoncentrationen, den inhiberende effekt fra brintkoncentrationen samt omsætningsgraden.



Figur 8.10 (Fra bilag 6, figur 1.2). Skitse af opstillingen med Makro-TGA reaktoren.

Varmetransporten i halmen baseres på resultater af undersøgelsen beskrevet ovenfor under varmetransport i halm. (Se bilag 6). Der opnås god overensstemmelse mellem måling og beregning, og det er hermed under meget kontrollerede forhold vist, at modellering af koksfor gasning i en reaktor fyldt med "koksstrå" kan gennemføres med godt resultat. (Se figur 8.11).



Figur 8.11 (Fra bilag 6, figur 3.25). Den beregnede og målte værdi af den tilsyneladende reaktivitet ved fem forskellige temperaturer i Makro-TGA reaktoren.

Herudover er det vist, at kanaldannelse gennem denne lille koksbed kan beskrives og forudsiges.

Senere er yderligere reaktivitetsmålinger af halm foretaget. (Se ref. a-45).

Resultaterne fra denne undersøgelse er anvendt til at fastslå, at den her anvendte metode er velegnet ved modellering af en koksbed, og med afsæt heri er modellering af koksbeds i egentlige forgassere gennemført.

Makro-TGA udstyret er anvendt til at undersøge omsætningshastigheden af store kokspartikler fra træ (se ref. b-17). Der gennemføres målinger og modelberegninger, hvor der anvendes Langmuir Hinshelwood kinetik (fra ref. b-16), massetransport ved strømning og diffusion i den aktuelle gassammensætning, energitransport ved varmeledning og kemisk ligevægt i gasfasen.

De foreløbige sammenligninger mellem målinger og beregninger giver god overensstemmelse. Det fremgår, at forgasning af en stor kokspartikel er kompliceret, og ikke kan beskrives ved et enkelt fænomen.

Der foretages videre undersøgelser af problematikken gennem et Ph.D. projekt fælles med CHEC.

#### **8. 4. 3 Uorganiske stoffers indflydelse på reaktiviteten.**

Som tidligere nævnt afhænger koksreaktiviteten af omsætningsgraden. Ofte stiger reaktiviteten med omsætningsgraden. Dette kan skyldes forskellige forhold, f.eks. ændret porestruktur i koksen. Men også koksens indhold af uorganiske forbindelser kan have betydning, idet koncentrationen heraf stiger, efterhånden som omsætningen skrider frem. Herudover har den katalytiske effekt fra de uorganiske bestanddele indflydelse på hele reaktivitetsniveauet.

I bilag 5 og ref. a-77 ses, at de uorganiske bestanddele i halm har overordentlig stor indflydelse på koksens reaktivitet. Det er vist, at udvaskning af uorganiske bestanddele fra halm og koks forårsager reduktion af koksens reaktivitet.

Efterfølgende genindvaskning af disse bestanddele bevirker, at koksreaktiviteten stiger til det oprindelige niveau. Det er vist, at ved at opkoncentrere de uorganiske bestanddele (specielt kaliumforbindelser) kan reaktivitetsforøgelse op til en faktor 10 opnås. (Se ref. a-77). Der er indført et index, der afhænger af forholdet mellem askens indhold af siliciumoxid og kaliumoxid. Dette index kan med succes relateres til koksreaktiviteten. Det samme index anvendes i forbindelse med askesintrang.

Resultaterne fra reaktivitetsundersøgelserne anvendes ved modellering af koksbeds. I forbindelse med modellering af strømningsforhold i en koksbed er resultaterne ligeledes anvendt.

#### **8. 5 Strømning af gas gennem en koksbed.**

Når koks forgasses i en fixed bed forgasser, sker dette ved at gas strømmer gennem koksbedden og har kontakt til kokspartiklerne. Det er afgørende for en sådan reaktors effektivitet, at tryktabet over koksbedden er begrænset. Det er også afgørende for at få en effektiv koksomsætning, at der strømmer forgasningsmiddel til alle partikler.

### **8.5.1 Tryktab**

Når gas strømmer gennem en koksbed, opstår et tryktab over bedden. Erfaringer fra forgasningsanlæg af medströmstypen viser, at tryktabet kan variere meget. Nogle gange ses meget lave tryktab, medens der andre gange observeres tryktab, der stiger i en sådan grad at driften må stoppe. Den tilgængelige viden på området er yderst begrænset, og derfor er der behov for undersøgelse, der kvalitativt og kvantitativt giver en forbedret forståelse af området.

Der er udført målinger af tryktabet over en reaktor fyldt med kokspartikler gennemstrømmet med luft ved atmosfæretilstand. Kokspartiklerne var sorteret efter størrelse, og binær blandinger er undersøgt.

For partikler med ens størrelser giver Erguns ligning et godt estimat af tryktabet, men for beds der består af partikler med binær størrelsesfordeling kan der opnås lidt bedre overensstemmelse med eksperimenter ved anvendelse af Standish formler.

Usikkerheden ved beregningerne er dog ganske betragtelig i alle tilfælde (inden for 50% må betragtes som godt), og Erguns formel anvendes i bred udstrækning.

Tryktabet afhænger af en række parametre, der vedrører gassen (viskositet, massefylde og hastighed), og en række, der vedrører partiklerne. Dem, der vedrører partiklerne, er primært bedens porøsitet, partiklernes middeldiameter og størrelsesfordeling, partiklernes geometri, overflade og friktionsfaktor. (Se ref. a-53).

Der er foretaget en række målinger af tryktab over en bed af træflis.

For såvel træflis som kokspartikler ses, at såvel viskose som dynamiske forhold har væsentlig indflydelse på tryktabet. (Se ref. a-112). For en bed af træflis er det vist, at tryktabet per længdeenhed er større i lodret retning end i vandret. Forholdet er ca. en faktor 3. Forskellen skyldes orienteringen af flisstykkerne under pakning af bedden. (Se ref. a-112).

Under forgasning sker der en nedbrydning af partiklerne. Denne nedbrydning afhænger af en række parametre og er afgørende for partiklens ydre geometri, der igen har indflydelse på strømmingen gennem koksbedden.

Partiklernes geometri som funktion af omsætningsgraden er ikke kendt, og to forskellige modeller, der repræsenterer to ekstreme situationer, anvendes traditionelt. Den ene antager, at al omsætning sker på overfladen af partiklen, hvorfor denne skrumper ind efterhånden som den omsættes (skrumpemodell). Den anden antager, at al omsætning foregår i partiklens indre og partiklen ændrer derfor ikke størrelse under omsætningen (porøs modell).

Der kan anvendes kombinationer af disse modeller.

Der er foretaget beregningsmæssige undersøgelser, hvor stationære endimensionale matematiske modeller af en fixedbed medströms koksfor-gasser er kombineret med tryktabsberegninger og forskellige modeller af partiklernes geometriændring ved omsætning. (Se bilag 9). Med udgangspunkt heri er videre modellering gennemført. (Se ref. a-89, a-109 og a-112).

Disse teoretiske beregninger giver en kvantitativ fornemmelse af hvad der sker i en for-gasser under forskellige forhold. Det forklarer, hvorfor tryktabet per længdeenhed

er størst ved risten og derfor også, hvorfor selv en begrænset bevægelse med risten giver en væsentlig tryktabsreduktion.

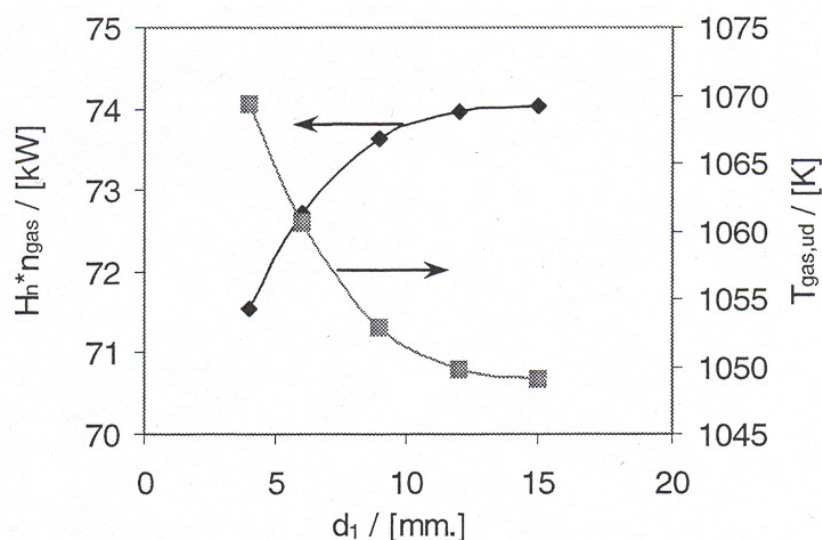
Herudover vises at koksens reaktivitetsmæssige egenskaber har væsentlig betydning for tryktabet i en koksreaktor. Det ses også, at partiklernes geometriske forandring som funktion af omsætningsgraden er meget væsentlig for tryktabet, hvorfor dette kræver nærmere undersøgelser.

Størrelsesordenen af de beregnede tryktab svarer til den, der ses under forsøg.

### 8.5.2 Strømning

Som nævnt ovenfor må strømningen gennem koksbedden sikre, at der transporteres forgasningsmiddel til al koksen. Det er derfor vigtigt at beskrive og forstå fordelingen af gasmassestrømmen gennem en koksbed. Til dette formål er der opbygget forskellige matematiske modelleringsværktøjer, der beskriver strømningen gennem en medstrøms fixedbed koksfor gasningsreaktor.

Der er her arbejdet med tyndfilmsmodeller (strømning i kun en retning men med varierende hastighed), CFD modeller og andre flerdimensionale strømningsmodeller. Strømningsmodellerne er koblet til forgassermødeller, og partikkelmodeller.



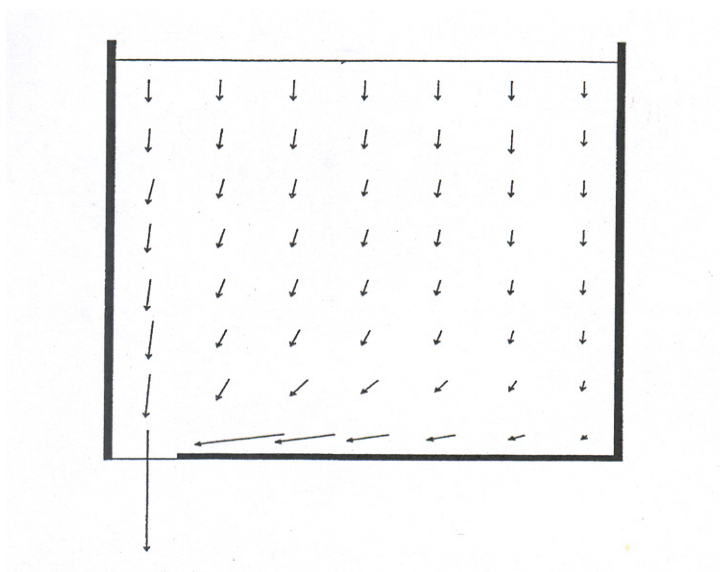
Figur 8.12 (Fra ref. a-89, figur 22). Gassens energiindhold (brændværdien) og gastemperaturen som funktion af diameteren af partiklerne i den ene halvdel af koksreaktoren. Diameteren af partiklerne i den anden halvdel er konstant 15 mm.

Det er således muligt at udregne koksomsætningen i en koksbed ved forskellige fordelinger af partikelstørrelse, bedporøsitet eller andre variationer, der vil forårsage ujævn strømning. Det viser sig, at når blot kokstilførslen fordeles over overfladen, er bedden stabil, og der opstår ikke skævvridning eller kanaldannelser.

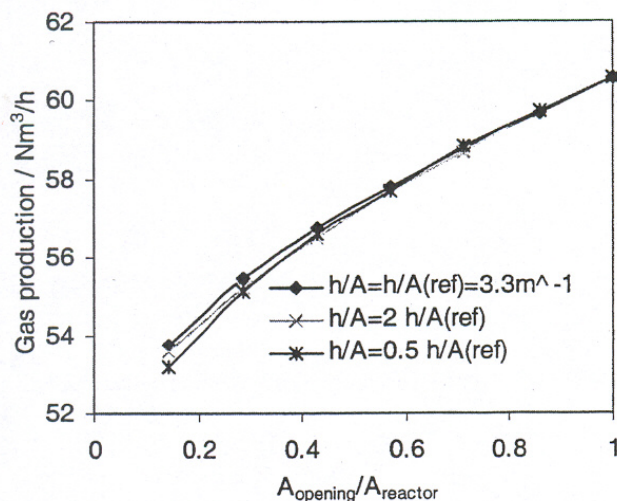
Herudover vises, at ujævn strømning giver en begrænset reduktion af koksomsætningen. Tværstrømning i koksbeden syntes ikke at føre til væsentlige ydelsesreduktioner. Strømningsforholdene har trods alt en begrænset indflydelse på koksfor gasningen.

Resultaterne viser, at det ikke ser ud til, at der findes begrænsninger i tværsnitsarealet eller i koksbeddens diameter/højde forhold hvis blot udjævning af koksbedoverfladen finder sted, og gassen udtages under koksbedden f.eks. efter passage af en vandret rist. (Se figur 8.12).

Hvis gasudtaget er placeret langs reaktorens periferi nederst i bedden, reduceres gasproduktionen. Men for diameter/højde forhold på omkring 1 er reduktionen begrænset. (Se ref. a-112 og figurene 8.13 og 8.14).



Figur 8.13 (Fra ref. a-112, figur 8). Beregnet gasstrøm vises for en situation, hvor der kun er gasudtag i den ene side af reaktorens bund.



Figur 8.14 (Fra ref. a-112, figur 14). Gasproduktionen ved forskellige forhold mellem koksbedhøjde og reaktorens tværsnitsareal vises som funktion af den andel af reaktortværsnittet, som gasudtaget i reaktorbundens ene side udgør (Bed volumen er fastholdt til  $0.05 \text{ m}^3$ ).

Modelleringen viser, at hvis der efter en stabil periode introduceres en ændring i en parameter, f.eks. ændring af diameteren af de tilførte kokspartikler, tager det størrelsesordensmæssigt 50 timer før tilstandene i koksbedden atter er stabile. Dynamikken i en koksbed er altså ganske langsom.

Sammenligning mellem tyndfilmmodellen og andre todimensionale modeller viser, at tyndfilmsmodellen i de fleste tilfælde giver et godt billede af forholdene. Der er foretaget sammenligning af CFD modelleringsværktøj med simple opbyggede modeller af strømning i en koksbed. Der er ikke set væsentlige fordele ved CFD modelleringen. Ved hjælp af CFD modellering er kanaldannelse modelleret.

## 8.6 Askeundersøgelser

Der er foretaget en række undersøgelser af askens egenskaber med hensyn til slaggedannelse og sintring. Dette skyldes, at disse fænomener har stor indflydelse på forgasseres drift. Arbejdet er i stor udstrækning gennemført i samarbejde med Lasse Holst Sørensen, ReaTech.

Der er primært fokuseret på halm, idet dette brændsel giver store problemer med slaggedannelse og korrosion som følge af et højt askeindhold.

Der er gennemført teoretiske undersøgelser med beregninger af kemiske ligevægte og fase-ligevægt ved hjælp af beregningsværktøjerne FACT og HSC-Chemistry. Dette er udført af ReaTech. Der er gennemført laboratorieforsøg og fuldskalaforsøg på kraftværker.

Der er gennemført en række laboratorieforsøg med forgasning af biomassekoks i Makro-TGA udstyret. Prøvestørrelsen er ca. 10 gram, og herved opnås en

restaskemængde, der er stor nok til at den kan underkastes alle de relevante undersøgelser. Der anvendes et sintringtal (0-4 stjerner) der ud fra en visuel (med lysmikroskop) og berøringsmæssig vurdering angiver graden af sintring. Mange brændsels aske er undersøgt på denne måde efter forgasning under forskellige forhold. Herudover er et teoretisk beregnet index indført. Dette er baseret på forholdet mellem siliciumoxid og kaliumoxid og anvendes til at vurdere tendensen til såvel sintring som korrosion.

Forskellige additiver er tilsat brændslet, og effekten på reaktiviteten og askesintringen er undersøgt.

Der er gennemført studier af forskellige brændsler, når disse er forgasset i ren vanddamp eller CO<sub>2</sub>. Nogle af de prøver, der er undersøgt, stammer fra en undersøgelse på Teknologisk Institut i Århus af biomasse under forbrændingsbetingelser. (Se ref. a-103).

Der viser sig store forskelle i såvel brændslernes reaktivitet som tendensen til askesintring.

I samarbejde mellem Biomasseforgasningsgruppen og ReaTech er der udviklet et fosfor - kalk baseret additiv CAP. Dette er testet i forskellig sammenhænge, dels ved halmforgasning i 100 kW tottrinsforgasseren og dels ved tilsætning til en kraftværkskedel. Resultaterne er positive, og additivet er patentanmeldt (Se ref. p-4 og p5).

### **8. 7 Partikler i gassen.**

Partikelindholdet i forgasningsgas er interessant, idet partikelkoncentrationen skal være på et meget lavt niveau, før gassen kan anvendes i gasmotorer og lignende. Undersøgelser af partikler i forgasningsgas er foretaget i tæt tilknytning til udviklingen af tottrinsforgasningsprocessen.

Partiklerne i gassen kan have forskellig karakter og oprindelse. Der kan være medrevne små kokspartikler, sod dannet ud fra tjærekompener, medrevne askepartikler og udkondenserede partikler med uorganisk sammensætning.

Ved de første forgasningsforsøg på DTU blev partikelindholdet udelukkende kvantificeret med en Bosh sodtalsmåler, og det kunne hermed vises, at partikelkoncentrationen var afhængig af procesbetingelserne under forgasningen. Partiklernes størrelsesfordeling blev søgt målt ved at udtage partikelprøver fra filtre i gassen. Efterfølgende blev disse tilsat væske med dispergeringsmiddel, således at partiklerne ikke klumpede sammen, men frastødte hinanden. Ved lysmikroskopi blev størrelsesfordelingen anslået til to grupper med middeldiameter på henholdsvis 5 og 50 my. Disse karakteriseringer viste sig senere at være misvisende.

Problemer med gasrensesystemet i forbindelse med 450 kW anlægget i Blære foranledigede undersøgelser sigtende på karakterisering af partikler fra forgassere af medstrømstypen. Væsentlige dele af dette arbejde blev gennemført under to eksamensprojekter. (Se ref. b-5 og ref. c-1). Målinger på 100 kW forgasseren blev gennemført dels før og dels efter optimeringen af denne forgasser. (Se afsnit 7.7 og 7.8). Forsøg på medstrømsforgasseren i Høgild blev ligeledes gennemført.

Der blev anvendt isokinetisk gasudtag og kaskadeimpaktorer til at karakterisere partiklernes størrelsesfordeling. Endelig blev partikelprøver undersøgt ved elektronmikroskopi. Et typisk eksempel på en partikelstørrelsesfordeling er vist på figur 7.12. Eksemplet er fra 100 kW forgasseren efter optimeringen ved to forskellige værdier af forholdet mellem tilsat brændsel og vanddamp. Det anvendte brændsel er her løvtræsflis. Størrelsesfordelingen var ens før og efter optimeringen af forgasseren.

Partikeldiameteren lå mellem 1 og 0,1  $\mu\text{m}$ , og middelpartikeldiameteren var i alle tilfælde ca. 0,2  $\mu\text{m}$ . Elektronmikroskopiundersøgelserne viste at partiklerne er agglomerater af små sodlignende kugler med en diameter på omkring 70 nm. Undersøgelser af partikler fra medstrømsforgasseren i Høgild viste helt tilsvarende resultater.

På overfladen af partikler fra tottrinsforgassere er der fundet udkondenserede tjærestoffer. (Se ref. a-59). Mængderne er dog forholdsvis begrænsede og foranlediger ikke, at partiklerne bliver klæbrige eller på anden måde giver problemer for driften af posefiltre eller lignende. Det må dog betegnes som en fordel, hvis partikler med belægninger ikke kommer i kontakt med vandholdigt kondensat, da dele af tjærelægningerne eventuelt kunne opløses i kondensatet og forurene dette. Herved ville bortskaffelse af kondensatet besværliggøres.

Der er i undersøgelser af partikler udrenset vha. posefiltre fra tottrinsforgassere fundet små mængder af større partikler, der kunne karakteriseres som medrevet koks. Der er set partikler med stort uorganisk indhold f.eks. ved forsøg med forgasning af halmpiller i 100 kW forgasseren (se afsnittet 7. 9).

Partikelmængdemålingerne viser klare sammenhænge mellem forholdet mellem tilsat brændsel og tilsat vand, medens størrelsesfordelingen ikke påvirkes heraf (Se figur 7.12).

I samarbejde med Risø er der opstillet teoretiske beregninger over dannelse af sod ud fra tjærestofferne fra pyrolyse udsat for forholdene under den partielle oxidation. Der vises potentielle dannelsesmekanismer. Sigtet er at finde muligheder for minimering af sodproduktionen.

## **8. 8 Systematisering**

Der er gennemført teoretiske studier af opsplittning af forgasningssystemer i nogle grundlæggende delprocesser. Målet var at forbedre mulighederne for at analysere funktionen af forskellige forgasningssystemer. (Se ref. a-18 og a-21). Systemet fungerede, men er ikke anvendt ret meget.

## **8. 9 Miljøeffekter og vaskevandsrensning**

Der er tidligt først i halvfemserne foretaget et studie af miljøpåvirkningen fra bestanddele dannet ved forgasning. (Se ref. a-12). Det konkluderedes, at tjærestoffer var den største miljømæssige risiko, og at forgasningsprocesser, der minimerer eller eliminerer behovet for tjærebortskaffelse, var attraktive. Senere er der bl.a. hos Jes La Cour, Universitetet i Lund foretaget undersøgelser af nitrifikationshæmningen ved



udledning af vaskevand fra tottrinsforgassere. (Se ref. a-56 og a- 63). Resultaterne viste bl.a. at når gas fra en tottrinsforgasser renses med et posefilter over vanddugpunktet, vil det kondensat, der dannes i en efterfølgende afkøling, kunne udledes som industrispildevand.

I forbindelse med rensning af det vandholdige kondensat fra Harboøreforgasseren har Biomasseforgasningsgruppen bidraget til udvikling af den termiske vandrensingsenhed, der anvendes i dag.

## **8.10 Modellering**

Der er frembragt en lang række matematiske modeller af forgassere og forgasningsprocesser. Modellerne er implementeret ved hjælp af forskellige computerbaserede simuleringværktøjer. De værktøjer der primært er brugt er : Excel, SIL, EES, DNA, Dymola-modelica, Star CD, Matlab.

Modelleringen har forskellige formål. Nogle modeller sigter mod egentlige dimensionerings- og designværktøjer, men det primære formål med modelleringen er, at opnå en forbedret forståelse af forskellige aspekter inden for forgasningen. Nogle modeller beskriver forgassere og processer, hvori forgassere indgår ud fra overordnede energisystembetragtninger. Andre modeller beskriver processer i komponenter eller brændselsdele på forskelligt detaljeringsniveau.

Hovedvægten af modelleringsarbejdet ligger på systemmodellering og modellering af koksomsætningen i en fixed koksbed. Dette skyldes at systembetragtningerne er energimæssigt yderst interessante, og at koksomsætningen i koksreaktoren må betragtes som procesbegrænsende.

I de tidligere afsnit omtales eksempler på anvendelsen af modelleringen.

### **8.10.1 Systemmodeller**

Systemmodellerne betragter forgasningen som bestående af et antal forbundne kontrolvoluminer. Der anvendes primært masse og energibevarelse samt kemisk ligevægt af gasfasen. De stationære systemmodeller beskriver temperaturniveauer, ydelse og virkningsgrad, varmetab, forskellige energistrømme osv.

Udvidede modeller af denne type inkluderer varmeveksling, såkaldte Pinch-problemer, og kan derfor anvendes til at vurdere hvilke komponentkoblinger, der er bedst egnede. F.eks. er Vikingforgasserens varmevekslersystem designet ved hjælp af sådan en model, og dette er en medvirkende årsag til, at der er opnået verdens bedste virkningsgrad fra biomasse til el for anlæg under 100 kW (24% beregnet og 25% målt).

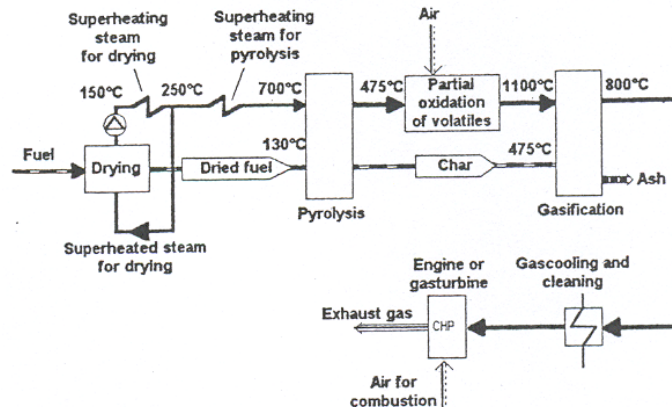
Der er opbygget overordnede simple generaliserede systemmodeller, der kan anvendes på en lang række forskellige forgassere.

Herudover er mere specifikke systemmodeller opbygget for tottrinsforgassere, andre trinopdelte forgassere, modstrømsforgassere, traditionel medstrømsforgassere og LT-CFB fluidbedforgasseren.

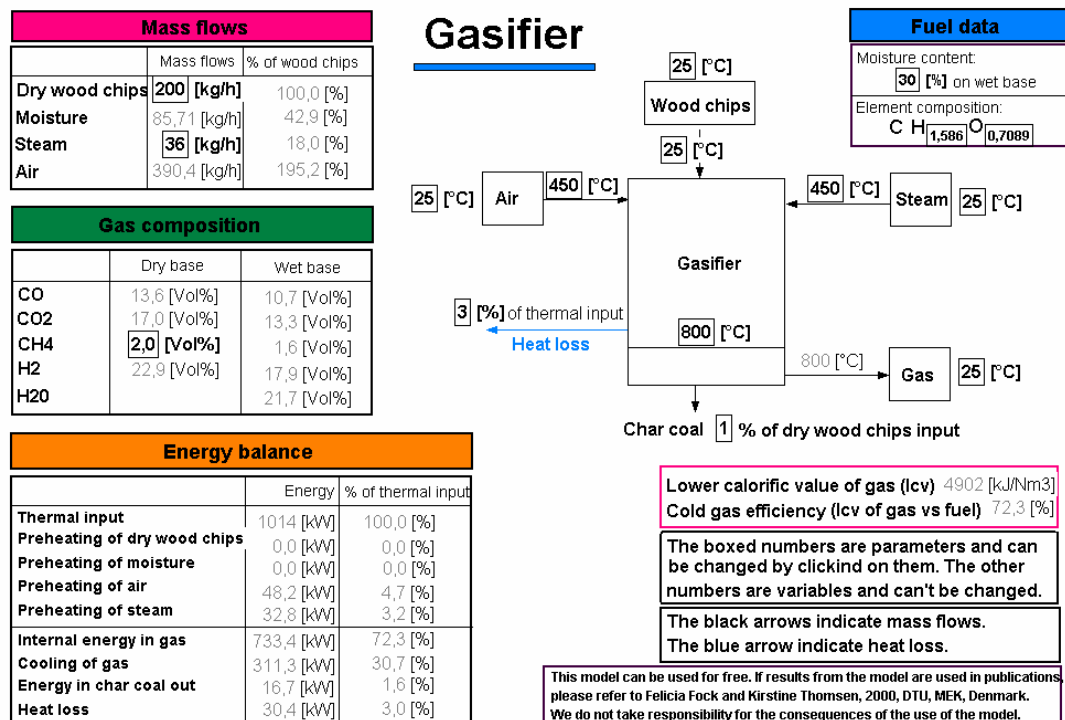
Der er bygget modeller af koblingen mellem forgassere til gasmotorer, stirlingmotorer, direkte og indirekte fyrede gasturbiner, kraftværkskedler mm.

På figur 8.15 ses en skitse af et sådant system bestående af et antal kontrolvolumener. (Se i øvrigt bilag 1 samt referencerne a-42, a-72, a-76, b-1, b-6, b-9, b-14, b-21, b-24 og b-25).

Få figur 8.16 ses udskrift af brugerfladen for en simpel systemmodel, Størrelserne i de firkantede kasser er parametre som brugeren kan variere. Modellen er tilgængelig på <http://bgg.mek.dtu.dk/research/modelling/systems> og har navnet: gasifier.exe



Figur 8.15 (Fra ref. a-67, figur 3). Eksempel på en systemmodel.



Figur 8.16 Brugerflade for en simpel systemmodel af forgasning.

De fleste af de udviklede modeller beskriver stationære forhold, men nogle af modellerne tager sigte på at beskrive dynamiske forhold. Herved opnås mulighed for at udregne forskellige størrelses forløb. F.eks. beregning af ændring i koksbedhøjde, gassammensætningen og virkningsgrader ved lastvariationer, eller ved variationer i brændslets fugtindhold mm. (Se ref. a- 57 og b-2).

Forhold vedrørende opstart og nedlukning kan ligeledes beskrives ved dynamiske systemmodeller.

Dynamiske systemmodeller kræver kobling til komponentmodeller f.eks. af koksbeddens omsætning og pyrolyse.

### **8.10.2 Komponentmodeller**

Der er frembragt komponentmodeller på forskelligt detaljeringsniveau. Nogle er stationære, andre er dynamiske, og de har enten nul eller flere geometriske dimensioner. Metoden er i næsten alle tilfælde at opstille differentielle kontrolvolumener, hvori de styrende ligninger er formuleret. F.eks. masse og energibalance, masse- og energitransport, entalpistrøm, kemisk ligevægt, kemisk kinetik af de begrænsende reaktioner (f.eks. koksreaktivitetens afhængighed af temperatur, lokal gassammensætning og omsætningsgrad), varmeledning, osv. Forskellige effekter kan udelades, og forsimplinger kan foretages. De opstillede ligninger og anvendte stofdata baseres i stor udstrækning på undersøgelser beskrevet i dette afsnit om generelle undersøgelser eller i afsnittene om forgasning sigtende på decentral kraftvarme.

Som eksempel på en komponentmodel kan nævnes en koksbedmodel, der er beskrevet i ref. a-74 og b-16.

### **8.11 Relationer mellem grundlæggende undersøgelser, modellering og forgasserudviklingen**

Relationerne mellem de grundlæggende undersøgelser og de udviklingsforløb der forløber dels på DTU, men også andre steder er her søgt illustreret.

Det fremgår at disse relationer ikke er enkle, og at udvikling og forskning ofte er flettet ind i hinanden.

Nogle af de grundlæggende undersøgelser er iværksat for at give data til modelleringsprojekter. Dette gælder f.eks. undersøgelse af varmeledning i en koksbed, masse og energibalance for pyrolyse, dele af undersøgelsen af tjæredekomponering, tryktabsundersøgelser og koksreaktivitetsundersøgelser. Resultaterne fra modelleringen bidrager herefter til forståelse af, hvad der sker f.eks. i forgassere og forgasningssystemer. F.eks. bidrager koksbedmodellerne og strømningsmodellerne til at forstå, hvorfor forskellige brændselsegenskaber giver forskellige tryktabsforhold og omsætningsforhold i en koksbed. Med hensyn til undersøgelserne af varmeledningsevnen i en koksbed anvendes disse resultater også til modellering af risteforbrænding.

Undersøgelserne vedrørende aske og additiver er foranlediget af problemer med belægninger og korrosion i forbrændingsanlæg samt af problemer med sintring og slaggedannelse i forgasningsanlæg. Resultaterne er frembragt ved teoretiske studier,

laboratorieforsøg, og det udviklede brændselsadditiv er undersøgt ved forsøg i større skala f.eks. på kraftværkskedler.

Andre undersøgelser er gennemført i tæt forbindelse med udviklingsaktiviteter af tottrinsforgassere, og en række er iværksat som følge af problemer i dette udviklingsforløb. (F.eks. partikelkarakterisering). En række af resultaterne af disse undersøgelser anvendes også i forbindelse med modellering.

Den væsentligste anvendelse er dog nok opnåelse af en detaljeret forståelse af, hvad der sker i en forgasser. Dette er ofte det afgørende i forbindelse med problemløsninger og udformninger af forgasningsanlæg.

F.eks. har forståelsen af partiklernes karakter bidraget væsentligt til at finde et simpelt posefilterbaseret gasrensningssystem til erstatning for de mere komplicerede vådskrubere. En række andre forgasserudviklingsprojekter har høstet fordel heraf (F.eks. TK-Energi og Biosynergi). Det skal dog nævnes, at partikelkarakteriseringsundersøgelserne blev gennemført samtidig med de første posefilterundersøgelser. Dette illustrerer, at netop samspillet mellem den praktiske anvendelse og den grundlæggende forståelse er helt afgørende for succes.

Ved løsningen af problemerne med tjære i gassen fra 100 kW tottrinsforgasseren (se afsnit 7,8) var det afgørende, at vi allerede vidste, at der faktisk var en del tjære i produkterne fra den partielle oxidation, og at der måtte foregå en yderligere dekomponering over koksbedden. Herved kunne problemet med at gas strømmede uden om koksbedden identificeres som problemets kerne, og da dette blev undgået, resulterede det omgående i, at der som tidligere var lave tjærekoncentrationer i gassen. Grundlæggende undersøgelser dokumenterede, at tjærenedbrydning ved tottrinsforgasning foregår såvel ved partiel oxidation som ved gassens passage gennem koksbedden. Da denne sammenhæng blev publiceret i Sevilla i år 2000 (bilag 7), vakte det stor interesse fra andre forgasserdesignere.

## **9. Oversigt over øvrige aktiviteter**

For fuldstændighedens og sammenhængens skyld gives herefter en gennemgang af øvrige aktiviteter under Biomasseforgasningsgruppens arbejde som ligger uden for hovedlinierne i denne afhandling. Ulrik Henriksen har deltaget i eller ledet disse aktiviteter.

Først gennemgås forskningen inden for motorer anvendt til forgasningsgas, idet dette anses for nært tilknyttet anvendelse af forgasningsgas til decentral kraftvarme.

Indirekte fyrede gasturbiner indgår dog også i dette afsnit. Dernæst ses på pyrolyse- og forgasning sigtende på anvendelse i forbindelse med tilsatsfyring til kraftværkskedler.

### **9.1 Motorundersøgelser**

Anvendelse af forgasningsgas som brændstof til forbrændingsmotorer har været praktiseret i over hundrede år. Under anden verdenskrig kendte man i store dele af verden - også i Danmark - generatorgasdrevne biler. Enkelte gamle mennesker kan stadig fortælle historier om de problemer, der var forbundet med dette, bl.a. hvordan man måtte ud og skubbe bag på bussen op ad bakkerne, eller hvordan motorerne ofte skulle renses for tjære og sod, hvis brændslet ikke var helt tørt.

I litteraturen fra dengang kan man se, at det var et helt væsentligt problem at motorerne blev tilstoppede eller direkte ødelagt som følge af problemer med urenheder, specielt tjære, i gassen.

Det har været svært at finde pålidelige tal for, hvor stort et indhold af tjære og partikler motorer kan tåle. I en årrække var udmeldingen fra de betydende motorfabrikanter, at intet tjære i gassen (0,0 mg/Nm<sup>3</sup> gas) kunne accepteres.

Imidlertid må det siges, at dette nok var et lidt for restriktivt krav, men at den tilladelige tjærekonzentration i gas til motordrift afhænger af tjærens sammensætning og af motorens konstruktion.

Efter interessen for termisk forgasning af biomasse og anvendelse af den producerede gas i gasmotorer genopstod sidst i forrige århundrede, blev det klart, at teknologien fra anden verdenskrig og tidligere havde en række uheldige egenskaber. Det var vanskeligt at udrense tjære fra gas, og vanskeligt at skaffe tjæren af vejen på en miljømæssig forsvarlig måde. Derfor startedes arbejdet med udvikling af forgasningsteknologi. Tilsvarende blev der iværksat forsknings og udviklingsarbejde med opbygning af viden vedrørende anvendelse af gasmotorer til decentral kraftvarmeproduktion med forgasningsgas som brændsel.

I gamle dage var kravet blot motorkraft, men nu til dags kræves langt mere. Der kræves bl.a. lang levetid, lav investering, lille vedligeholdelse, høj virkningsgrad og lav miljøbelastning.

For at kunne imødegå disse nye krav iværksattes forskningsmæssige undersøgelser bl.a. på laboratoriet for energiteknik, DTU under det, der i dag hedder Biomasseforgasningsgruppen.

Der er frem til nu udelukkende foretaget undersøgelse af ikke turboladede motorer.

### **9. 1. 1 Forsøgshistorie**

Midt i firserne blev en meget tjæreproducerende forgasser, der var konstrueret ved ombygning af en fastbrændselskedel anvendt i forbindelse med en encylindret gasmotor. Motorens indsugningssystem og ventilarrangement blev hurtigt fedtet grundigt ind i tjære, og når motoren stoppede, størknede tjæren, således at genstart var umuligt idet indsugningsventilen ikke kunne lukke op. (Se ref. a-1).

Disse forsøg bekræftede, at tjære er uønsket i gas, der skal anvendes som motordrift.

Under forsøgene med den første tottrinsforgasser sidst i firserne (Se bilag 1), blev en plæneklippermotor (Briggs and Stratton) tilkoblet en lille generator og kørt på den producerede gas. Disse forsøg gennemførtes nærmest af pædagogiske grunde, men det blev da vist, at tottrinsforgasserens gas kunne anvendes som motorbrændstof, og der blev ikke fundet spor af tjære eller andre urenheder i motorens indsugningssystem efter et par timers drift.

Da 50 kW forgasseren blev bygget var det planlagt at tilknytte et motoranlæg. Dette blev etableret først i halvfemserne. Der blev anvendt en 4- cylindret 1,1 liters Fordmotor monteret i et lille kraftvarmeanlæg. Motoren kørte fint på gassen under dellast, men under fuldlast forekom der kraftig back-firing, hvilket vil sige at luft-gasblandingen i indsugningssystemet antændtes med et voldsomt knald til følge. Motoren kørte i alt ca. 20 timer. Der sås ingen belægninger eller lignende i motoren. Der blev kørt få timer med et andet lille kraftvarmeanlæg på gas fra 50 kW forgasseren. Dette var et Totemanlæg baseret på en Fiat 127 motor. Denne motor gav imidlertid også problemer med back-firing.

Først i halvfemserne blev der på DTU opbygget en motorprøvestand baseret på en encylindret 0,48 liters Bukh –motor. Denne var oprindeligt en dieselmotor, men nu ombygget til ottomotor. En væsentlig grund for denne opstilling var at undersøge og løse back-firingsproblemet. Gassen til motoren kunne enten være naturgas eller gas blandet fra trykflasker. Man kunne herved simulere gassammensætningen fra forskellige forgassere. Denne gas betegnes syntetisk forgasningsgas. Motoren blev belastet med en hvirvelstrømsbremse. Stemplerne var udformet således at stempeltoppene kunne udskiftes.

Der blev opnået mange interessante forskningsresultater med denne opstilling, men back-firing kunne ikke studeres på denne motor, idet fænomen kun optrådte her i meget ekstreme driftsituationer.

I forbindelse med 450 kW forgasseren i Blære, der blev opført midt i halvfemserne, blev en 6-cylindret 12,4 liter Perkinsmotor anvendt. Denne motor kørte fint på den producerede gas. Motoren kørte ca. 100 timer, og efterfølgende sås belægninger i cylindrene. Disse bestod af sod, koks og smøreolie. Der blev ikke observeret back-firing med denne motor.

Da 100 kW forgasseren blev bygget på DTU, blev en lille motorprøvestand tilknyttet og indkørt sidst i halvfemserne. Denne motorprøvestand var baseret på en firecylindret 1,1 liters Fordmotor, der blev belastet af en hvirvelstrømsbremse. Der opstod back-firing i stor udstrækning når denne motor kørte på tottrinsforgasningsgas, og der blev foretaget systematiske undersøgelser af fænomenet, hvilket førte til

mysteriets løsning. Denne motor har kørt ca. 120 timer på forgasningsgas. Ingen belægninger er set i motorens indre dele.

I forbindelse med Viking forgasseren (se afsnit herom) blev en 3-cylindret 3,5 liters Deutz-motor anvendt. Denne opstilling startedes første gang i 2002. Opstillingen havde en række formål, bl.a. lang tids drift. Motoren har nu kørt ca. 2000 timer på forgasningsgas, og ingen væsentlige problemer er set.

Som led i et samarbejdsprojekt (Se ref. a-84) er der kørt forsøg på en motorprøvestand i Japan. Der er foretaget undersøgelser af gasser blandet af syntetisk forgasningsgas og naturgas.

Oversigt over de anvendte motorer ses i tabel 9.1.

### **9.1.2 Belægninger**

Belægninger i motorens indsugningssystem skal være meget kraftige for i sig selv at give driftmæssige problemer for en gasmotor, men belægninger på dette sted f.eks. af tjære eller sod, indikerer, at der kommer urenheder videre ind i motoren. Når urenheder passerer indsugningsventilen, er der risiko for, at der afsættes belægninger på ventilstyr og ventilsæde samt på selve ventilen. Består disse belægninger af tjære, kan dette være klistrende og forhindre ventilerne i at bevæge sig.

Endvidere kan opvarmning af tjærestofferne forårsage koksdannelse, hvilket kan indebære en ret hård belægning, der kan give funktionsmæssige og slidmæssige problemer. Når urenheder strømmer videre ind i motoren, kan der opstå belægninger på stempeltoppen, på cylindervæg over stemplernes topdødpunkt og på topstykket. Kommer der urenheder ned langs stemplerne, kan stempelringenes funktion blive påvirket. Endelig kan tilstedeværelse af hårde slibende partikler forårsage ridser og slid i cylindervæg og stempelringe. Interaktioner mellem partikler og smøreolien kan bevirke belægninger, der kan bygge op i cylinderen over topdødpunktet.

Smøreolie kan i sig selv forårsage en del forkoksning og belægning af f.eks. stempeltop og topstykke uanset brændstoffet. Dette er bl.a. afhængigt af motorens slidtagemæssige tilstand.

I halvfemserne havde de mest betydningsfulde motorfabrikanter ingen erfaringer med at anvende forgasningsgas som brændstof til gasmotorer. Deres holdning var derfor, at der ikke kunne accepteres noget som helst tjære i den tilførte gas. Ej heller kunne partikler accepteres. Kulpartikler uden aske kunne dog accepteres op til 5-50 mg/Nm<sup>3</sup> gas.

Et lidt mere nuanceret billede var imidlertid nødvendigt, idet helt at undgå tjære i gassen så ud til at være et urealistisk krav, i hvert fald for modstrømsforgassere. Under de forsøg, der blev gennemført med motorer, der kørte på forgasningsgas, blev der derfor holdt øje med betydningen af urenheder i gassen.

I forbindelse med motordrift på den rensede gas fra 50 kW forgasseren blev motoren gentagne gange inspiceret, og der blev ikke observeret belægninger, der havde nogen betydning for motorens funktion eller drift. Der blev set en rødfarvning af topstykket.

Dette var jernforbindelser uden noget skadeligt potentiale. Sod eller tjærestoffer blev der ikke set spor af.

Under forsøgene med 450 kW forgasseren i Blære blev der efter ca. 100 timers drift set betydelige belægninger i motorens cylindre. Belægningerne sad på topstykket på cylindrene over stemplernes topdødpunkt og på stempeltoppene.

Belægningerne blev analyseret, og det viste sig at de bestod af aske, koks, sod og smøreolierester. Tjære eller tjærerelaterede belægninger blev ikke set. Det blev konkluderet at gassen indeholdt ikke ubetydelige mængder partikler bestående af sod og koksstøv. Disse partikler blev klistret fast på motorens indre dele ved hjælp af smørelie. Tilsvarende fænomener er rapporteret i litteraturen, når partikelholdigt udstødningsgas fra dieselmotorer er forsøgt recirkuleret til indsugningen for at begrænse NO<sub>x</sub> - dannelsen.

Der blev ikke observeret ridser eller slid som følge af belægningerne, men belægningerne fyldte op i forbrændingskammeret og var klart uacceptable. I dette tilfælde var det helt klart, at gassen indeholdt for høje partikelkoncentrationer.

I forbindelse med etablering af motordrift på den modstrømsforgasser, der er bygget af Vølund, og som opererer i Harboøre, blev der rettet opmærksomhed mod, hvordan nogle af de tjærestoffer, der findes i modstrømsforgasningsgas, ville påvirke belægningsdannelsen i en motor.

For at opbygge viden i takt med at motordrift blev etableret, blev der i samarbejde mellem Risø og Biomasseforgasningsgruppen startet et forskningsprojekt, der skulle undersøge belægningsdannelse forårsaget af et indhold af guaiacol og phenol i en gas med en sammensætning tæt på gassammensætningen fra modstrømsforgasseren i Harboøre. Disse stoffer kan tænkes at være udgangspunkt for sod og belægningsdannelse (Ref. c-3).

Der blev foretaget forsøg i laboratoriet på Risø, hvor modeltjærestofferne blev pyrolyseret, og produkterne blev ledt forbi en plade, hvorpå belægningerne kunne opsamles og efterfølgende analyseres. Resultaterne viste, at guaiacol gav belægninger, men at phenol ikke gjorde. Der blev ligeledes gennemført forsøg på DTU, hvor den omtalte motorprøvestand bestående af en encylindret Bukhmotor blev anvendt til forsøg med syntetisk gas tilsat henholdsvis guaiacol og phenol. Koncentrationerne var ti gange højere end i den rensede gas fra modstrømsforgasseren i Harboøre. Belægningerne i motoren blev analyseret. (Se ref. a-106).

Resultaterne viste, at ved tilsætning af guaiacol blev der observeret en lakagtig belægning på motorens stempeltop, hvorimod phenol ikke forårsagede belægninger. Referenceforsøg uden tjærestoffer gav samme belægninger som ved guaiacol tilsætning. Stempeltoppene med belægningerne blev analyseret, og der blev ikke fundet forbindelser, der kunne relateres til guaiacol. Belægningerne stammede måske fra smørelie, og det kunne ikke slutes at guaiacol forårsagede belægninger. Undersøgelsen tyder på at phenol kan have en reducerende effekt på belægningsdannelse.



Forsøg med motordrift på gas fra 100 kW forgasseren resulterede ikke i problematiske belægninger. Der blev observeret rødfarvning på topstykket, og mindre belægninger på stempeltoppene formodes at stamme fra smøreolie. Disse belægninger ligner dem, der kan observeres, når motorer kører på naturgas.

Inspektion af Deutz-motoren på Viking forgasningsanlægget efter 1500 timers drift viste ingen problematiske belægninger. Mindre koksbelægninger på stempeltoppene ligner, hvad der ville opstå ved naturgasdrift og er helt uproblematisk. Der sås ingen belægninger eller farvninger i motorens indsugningssystem.

Analyser af olie fra motorer, der har kørt på tottrinsforgasningsgas, viste ingen tegn på problemer. Tilsvarende har analyse af olie fra Harbøreforgasserens motorer vist for høje værdier for klor.

### **9.1.3 Back-firing**

Back-firing på gas fra tottrinsforgasseren blev observeret første gang, da Fordmotoren tilknyttet 50 kW forgasseren blev fuldladet. Som beskrevet i bilag 3 var dette en spektakulær oplevelse.

Back-firing er et udtryk, der beskriver at gas-luftblandingen antændes, medens den befinder sig i motorens indsugningssystem, og indsugningsventilen er åben. Dette bevirker en trykstigning i indsugningsudstyret, og hvis slanger, luftfilter eller andet går i stykker, følger et voldsomt knald. Udstyret kan blive beskadiget, og motoren mister effekt og virkningsgrad.

Back-firing blev kun observeret, når der anvendtes forgasningsgas under høj last på motorerne.

Problemet blev set på tre forsøgsopstillinger, nemlig Fordmotoren der var tilknyttet 50 kW anlægget, Fiat 127 motoren tilknyttet 50 kW anlægget og Fordmotoren, der var tilknyttet 100 kW anlægget.

Årsagerne til antændelsen af gasblandingen var gennem flere år ikke klarlagt.

Det var oplagt, at netop gassens indhold af brint var en medvirkende årsag, idet brint har vide tændgrænser og kræver en lav tændenergi. Litteratur beskrev fænomenet back-firing som et problem ved anvendelse af brintholdige gasser til motordrift, og gav en række årsager til antændelsen. Herudover gav litteraturen en række forslag til at imødegå problemet. (Se ref. a-14).

Af mulige årsager til antændelsen nævntes:

- Varme overflader i forbrændingskammeret
- Varm udstødningsventil
- Varm midterelektrode i tænderet eller isolationen omkring denne
- Varm restgas fra den foregående arbejds cyklus
- Glødende partikler på overfladerne
- Glødende partikler i restgassen
- Induktion indbyrdes mellem tænderkablerne
- Stort indhold af kobber i ventilsæderne
- Tilbagestrømning af varm røggas fra udstødningssystemet

Det fremgår af litteratur så langt som ca. 100 år tilbage, at problemet reduceres ved at sænke belastningen på motorerne. Herudover fokuseres der primært på, at antændelsen skyldes belægninger af glødende kulpartikler samt partikler i gassen.

Det var derfor naturligt, at det var de første muligheder der blev fokuseret på i forsøg på at løse problemet i forbindelse med tottrinsforgasningsgas.

Problemet blev ikke set på den encylindrede Bukhmotor i motorprøvestanden, på Perkinsmotoren i 450 kW anlægget i Blære (eller for den sags skyld ved forsøg med Deutz-motoren på Viking forgasningsanlægget).

Efter forsøgene med Bukhmotoren på motorprøvestanden og forsøgene i Blære hvor problemet ikke blev set, startede forsøg med 100 kW anlægget på DTU. Her viste problemet sig igen, og en systematisk undersøgelse af de mulige forklaringer blev iværksat.

Der blev kørt forsøg med syntetisk forgasningsgas (dvs. gas fra trykflasker blandet i samme forhold som gas fra 100 kW forgasseren), der er fri for partikler, og med gas fra 100 kW forgasseren som efter gasrensningen blev yderligere filtreret i et gigantisk twistfilter (Se ref. a-52). Anvendelsen af disse partikelfrie gasser gav stadig back-firingproblemer.

Tilbagestrømning af varm røggas blev undersøgt uden påviselig indflydelse på back-firingen.

Der blev foretaget afprøvning af tænderør med speciel høj varmeledningsevne, således at temperaturen på tænderørets varmeste dele ville reduceres. Dette forværrede blot back-firingsproblemet. Noget tydede derfor på, at problemet havde noget med tændingssystemet at gøre, og da ny litteratur samtidig omtalte back-firingsproblemer ved anvendelse af brint som motorbrændstof, og samtidig henledte opmærksomheden på induktion fra et tændkabel til et andet, blev det forsøgt at etablere elektrisk skærmning af tændkablerne. Herved løstes back-firingsproblemet fuldstændigt. (Se ref. a-70 og a-66)

Fænomenet forklares ved, at flammen ved afbrænding af brint har en lav ionisering, og dermed er dårlig til at transportere elektrisk ladning. Dette er i modsætning til flammen ved afbrænding af kulbrinter. Ved brintforbrænding aflades et tændkabel efter tændingen derfor dårligt, og der er et forholdsvis højt potentiale i kabler efter en tænding. Når nabocylindren efterfølgende tænder, inducerer nabotændkablet en yderligere spænding i det første kabel, og der kan opstå en lille gnist i tænderøret. Da den nødvendige energi, tændenergien, for at antænde brinholdige gasser er lav, kan ladningen herved antændes. Dette foregår, når indsugningsventilen er åben og back-firing finder sted.

At fænomenet hovedsagelig ses ved høj belastning skyldes, at der her er de bedste forhold for antændelse.

Årsagen til, at der ikke er set backfiring med den encylindrede Bukhmotor, er jo, at der kun findes et tændkabel. Den 6- cylindrede Perkinsmotor har sandsynligvis haft

skærmede tændkabler. Tændkablerne på Viking forgasserens Deutzmotor blev skærmet før opstart.

Som et kuriosum kan nævnes at efter publiceringen af løsningen af vores back-firingsproblem, modtog vi en e-mail fra Zimbabwe. Den lød kort og godt: "Thank you for solving our back-firing problems in Zimbabwe".

#### **9.1.4 Bankning**

Bankning, eller tændingsbankning som det også kaldes, er et langt mere alvorligt og almindeligt problem end back-firing.

Bankning har været genstand for mange undersøgelser, og de fleste moderne motorer er forsynet med bankningssensorer, der registrerer bankning og ændrer driftparametrene f.eks. tændingstidspunktet, således at bankningen holder op. Bankning er selvantændelse af gas-luftblandingen i cylinderen under kompressionsslaget. Dette har en række meget skadelige effekter på motoren. Bankningen forårsager store trykbølger i cylinderen, og dette resulterer i store belastninger af stempler og lejer. Herudover forårsager trykbølgerne forbedret varmeovergang i grænselaget ved cylindervæggene, hvilket kan give problemer med cylindervægstemperatur, smøring osv. Tendensen til bankning forøges ved tidlig tænding, fed blanding og højt maksimaltryk i cylinderen (højt kompressionsforhold).

Herudover er tendensen til bankning meget afhængig af det anvendte brændstof. Man taler om et brændstofs modstand mod bankning, og dette kan for gasformige brændsler udtrykkes ved metantallet. Dette er for ren metan 100, og for ren brint er det 0, hvilket betyder, at brint har en meget ringe modstand mod bankning. Ud fra forskellige gasarters metantal kan metantallet for gasblandinger beregnes ved hjælp af beregningsrutiner herfor.

Den danske naturgas har et beregnet (og målt) metantal til mellem 70 og 95. Gas fra tottrinsforgassere har ud fra sådanne beregninger et metantal på mellem 45 og 55. Det må derfor forventes, at denne gas ikke er særlig modstandsdygtig over for bankning. Under mange af motorforsøgsserierne under Biomasseforgasningsgruppen er naturgas anvendt som referencebrændstof. Der er ved de forskellige forsøg kun under meget ekstreme driftforhold set bankning på forgasningsgas, og sammenlignet med drift på naturgas er det rapporteret at tottrinsforgasningsgassen er mere bankningsresistent end den danske naturgas. (Se ref. a-40, a-70 og a-79).

På baggrund af disse observationer samt tilsvarende resultater for anvendelse af andre forgasningsgasser rapporteret i litteraturen, blev det besluttet at fremstille cylindertoppe til Bukh forsøgsmotoren, så et kompressionsforhold på 16,5 :1 blev opnået. Ved anvendelse af naturgas ved dette kompressionsforhold lykkedes det ikke at opnå stabil drift. Kun i meget ekstreme driftpunkter med meget lav last kunne bankning undgås.

På trods af tottrinsforgasningsgassens høje brintindhold, også sammenlignet med forgasningsgas fra andre forgasningsprocesser, kunne en gas med tilsvarende sammensætning anvendes ved det høje kompressionsforhold uden nogen problemer med bankning. Kun ved ekstremt tidlig tændingstidspunkt kunne bankning fremprovokeres.

Det er således klart, at gas fra en tottrinsforgasser er væsentlig mere bankningsresistent end dansk naturgas, og at det beregnede metantal ikke giver et retvisende billede af forgasningsgassens bankningsresistens. Vurdering af blandingsgassers bankningsresistens kræver beregninger af forbrændingsforløbet i cylinderen.

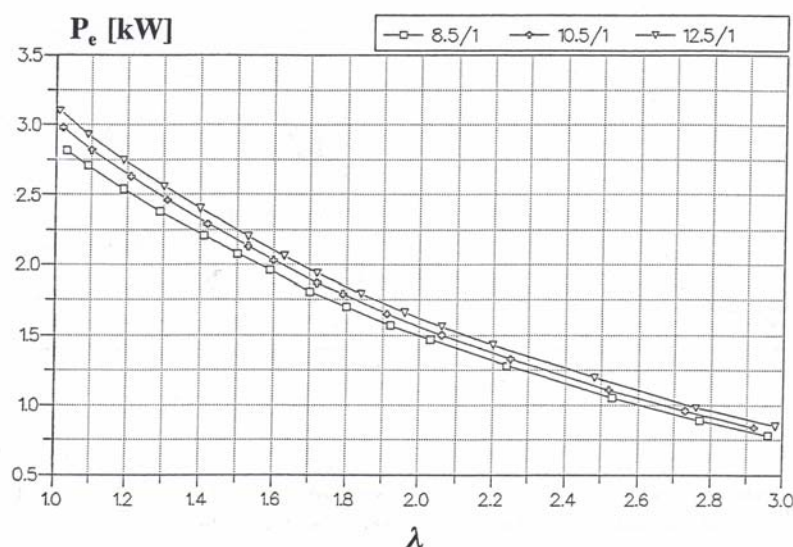
#### **9.1.5 Ydelse og virkningsgrad**

Ved anvendelse af forgasningsgas i motorer bygget til anvendelse af andre brændstoffer, forventes normalt en reduktion i ydelse og virkningsgrad. Dette skyldes dels, at forgasningsgas har en brændværdi, der er meget lavere end traditionelle brændsler. F.eks. er brændværdien af naturgas omkring 36 MJ/Nm<sup>3</sup>, medens gas fra tottrinsforgasser ligger mellem 4,5 og 7,0 MJ/Nm<sup>3</sup>. Den forventede lavere ydelse forventes at resultere i lavere virkningsgrader.

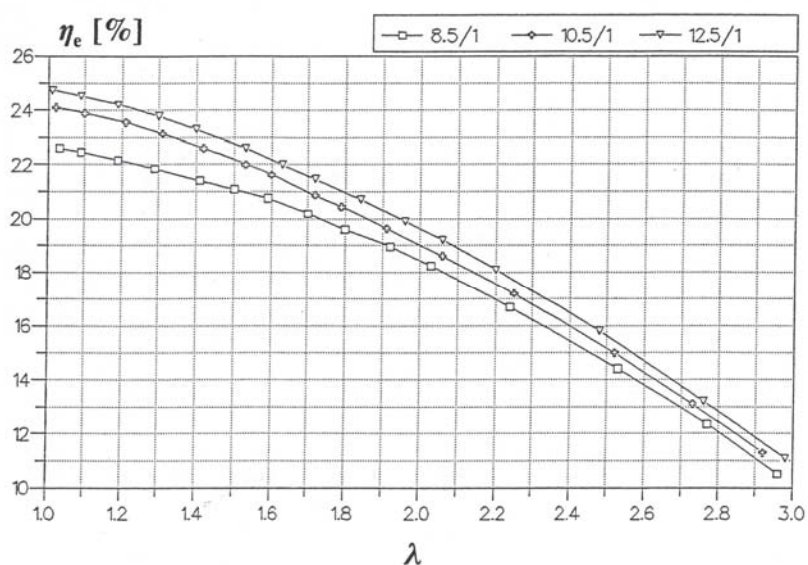
De første målinger af ydelse og virkningsgrader i Biomasseforgasningsgruppen var under indflydelse af de begrænsninger i belastning som back-firingsproblemet gav. Dog kunne det fra starten fastslås, at motorerne gik godt på dellast. Ved forsøgene med Fordmotoren på 50 kW anlægget, blev der over en periode på 3 timer målt en gennemsnitlig virkningsgrad fra gas til el på 19-20% ved en effekt på omkring 8 kW. Motoren kørte med luftoverskudstal på 1,1. Disse resultater var ikke specielt imponerende set i lyset af, at på naturgas og fuld last kunne motoren opnå en virkningsgrad på knap 30 %.

Forsøg med Perkinsmotoren på 450 kW anlægget viste virkningsgrader på omkring 25% fra gas til el. Denne motor var ikke tilknyttet anden brændstofforsyning end forgasningsgas, så referencemålinger på kendte brændsler kunne ikke opnås. Resultatet var heller ikke imponerende.

Bukh forsøgsmotoren blev tilført syntetisk forgasningsgas eller naturgas. Tændingstidspunktet blev justeret, så der blev opnået maximalt moment (MBT). Dette resulterede i at tændingstidspunktet blev varieret fra ca. 20 til 60 ° før topdødpunktet, når luftoverskudstallet steg fra ca. 1 til 3. Omdrejningstallet var 1500 rpm. (Se ref. a-40).



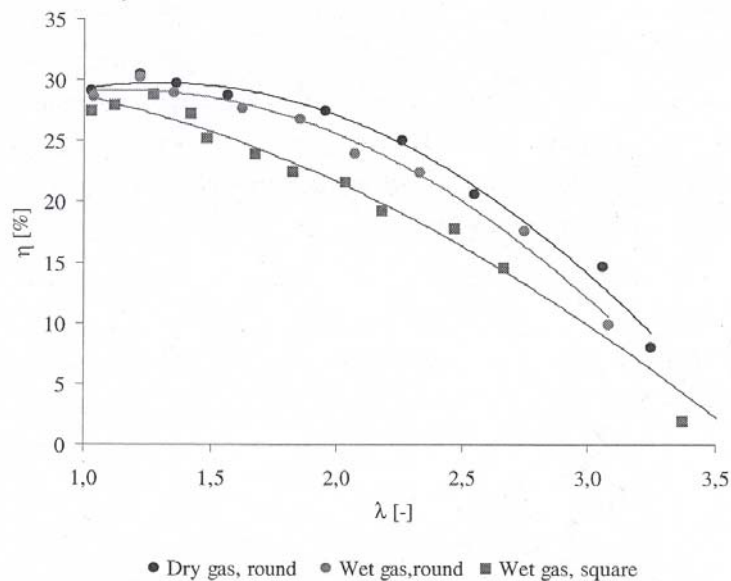
Figur 9.1 (Fra ref. a-40, figur 2.3). Effektiv akseleffekt som funktion af luftoverskudstallet ved tre forskellige kompressionsforhold. Forsøgene er udført med Bukh-motoren.



Figur 9.2 (Fra ref. a-40, figur 2.5). Effektiv virkningsgrad som funktion af luftoverskudstallet ved tre forskellige kompressionsforhold. Forsøgene er udført med Bukh-motoren.

Figur 9.1 viser ydelsen som funktion af luftoverskudstallet, og figur 9.2 viser virkningsgraden som funktion af luftoverskudstallet. Det er bemærkelsesværdigt at motoren gik godt ved luftoverskudstal op til 3. Dette tilskrives gassens høje indhold af brint, som med sine brede tændgrænser let antændes. Det fremgår af figur 9.2 at ydelsen alene ved at hæve luftoverskudstallet kan reduceres til under 15% af maksimal last.

Samtidig ses som forventet, at forøget kompressionsforhold gav øget effekt og virkningsgrad.



Figur 9.3 (Fra ref. a-79, figur 4.14). Akselvirkningsgrad som funktion af luftoverskudstallet ved forskellige gassammensætninger og forskellige stempeltopudformninger. Kompressionsforholdet er 16,5:1. Forsøgene er udført med Bukh-motoren.

Ved de efterfølgende forsøg med denne motoropstilling blev et kompressionsforhold på 16,5 :1 etableret. Forskellige udformninger af stempeltoppen blev undersøgt, og to forskellige gassammensætninger, begge som målt ved forskellige drifttilstande af 100 kW forgasseren, blev undersøgt.

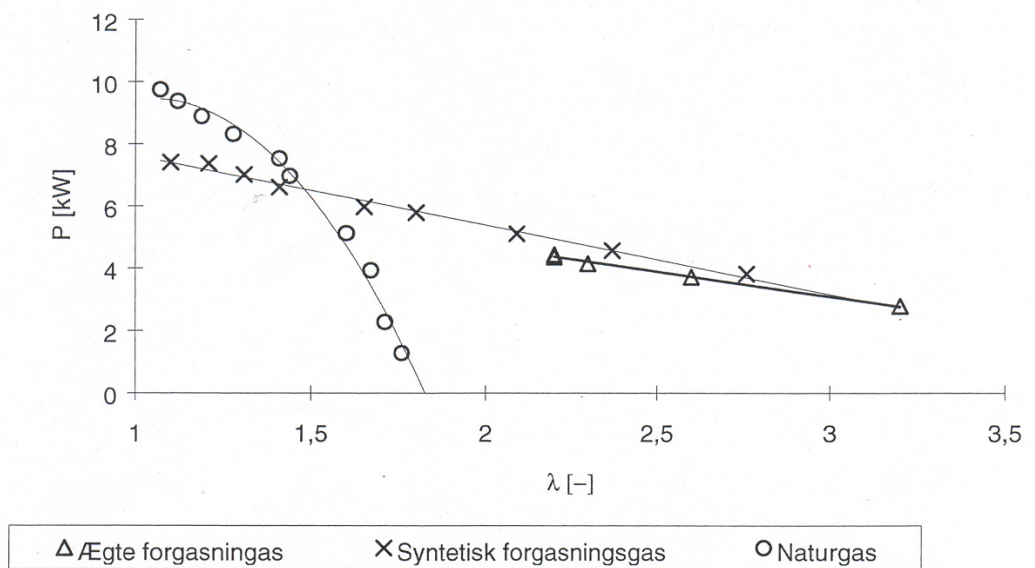
Der blev observeret en meget beskeden forøgelse i ydelsen, medens der blev set en markant forøgelse i virkningsgraden. (Se ref. a-79 og a-86). Samtidig blev det observeret, at for den ene stempeludformning var virkningsgradskurven ret flad for luftoverskudstal op til omkring 2 svarende til 2/3 last. (Se figur 9.3). Det fremgår også, at gassammensætningen har en vis betydning for ydelse og virkningsgrad, og det skal her bemærkes, at gassammensætningen ved disse forsøg er noget forskellig fra den, der blev anvendt ved de tidligere forsøg med denne motor (Den hvor kompressionsforholdet var 8,5:1, 9,5:1 og 12;5 :1). En væsentlig forskel er, at ved de tidligere forsøg var brintindholdet højere. Der blev også ved det høje kompressionsforhold observeret gode egenskaber ved drift med højt luftoverskudstal. Det fremgår videre af ref. a-79, at den volumetriske virkningsgrad falder lidt med faldende luftoverskudstal, hvilket må tilskrives temperaturniveauerne i motoren.

Der blev kørt forsøg med Fordmotoren tilknyttet 100 kW forgasningsanlægget.

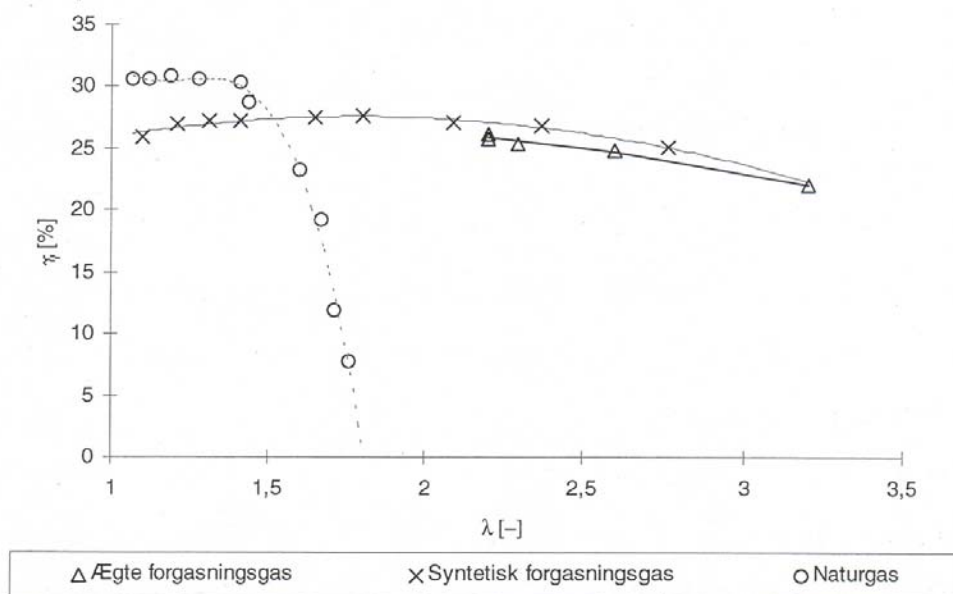
Ydelse og virkningsgrad er beskrevet ved forskellige driftforhold. Alle forsøgene er med fuld åben spjæld og tænding ved maksimal effekt (MTB).

Der er gennemført forsøg med et omdrejningstal på henholdsvis 1500 rpm. (Se figur 9.4 og 9.5) og 2250 rpm. (Se figur 9.6 og 9.7). Der er vist ydelse og virkningsgrad for naturgas og for blandingsgasser med forskellig sammensætning. Nogle gasser er

syntetiske, og andre er rigtige forgasningsgasser. Alle gasblandingerne svarer til totrinsforgasningsgas ved forskellige driftsforhold.

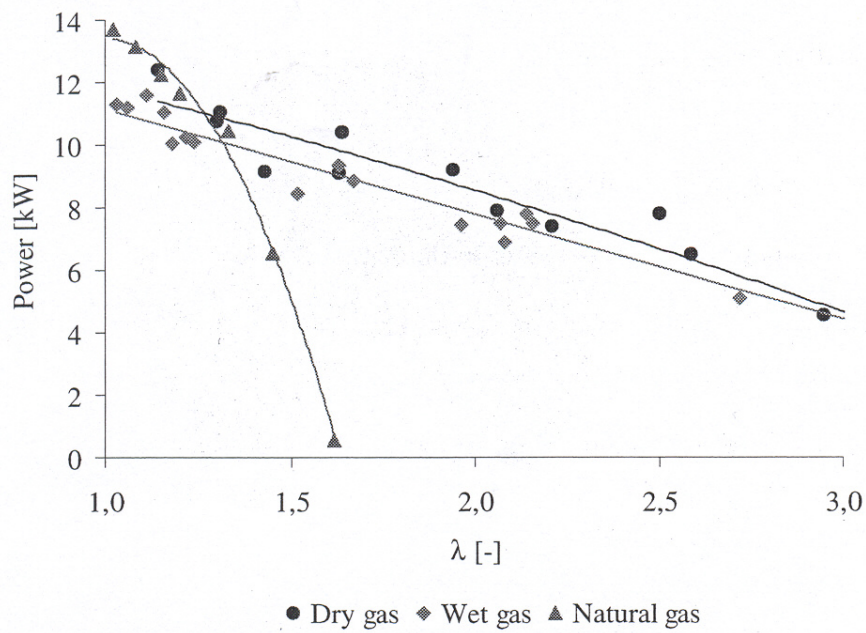


Figur 9.4 (Fra ref. a-70, figur 4.1). Akseleffekt som funktion af luftoverskudstallet ved forskellige gassammensætninger. Omdrejningstallet er 1500 rpm. Forsøgene er udført med Fordmotoren fra 100 kW forgasseren.

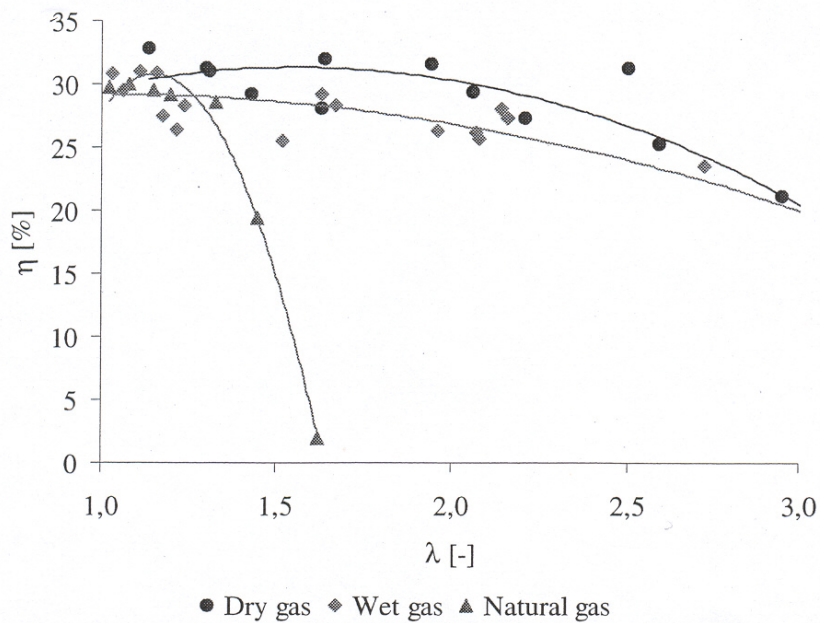


Figur 9.5 (Fra ref. a-70, figur 4.2). Akselvirkningsgrad som funktion af luftoverskudstallet ved forskellige gassammensætninger. Omdrejningstallet er 1500 rpm. Forsøgene er udført med Fordmotoren fra 100 kW forgasseren.





Figur 9.6 (Fra ref. a-79, figur 4.4). Akseleffekt som funktion af luftoverskudstallet ved forskellige syntetiske forgasningsgasser. Naturgas er anvendt til sammenligning. Omdrejningstallet er 2250 rpm. Forsøg udført med Fordmotoren fra 100 kW forgasseren.



Figur 9.7 (Fra ref. a-79, figur 4.5). Akselvirkningsgrad som funktion af luftoverskudstallet ved forskellige syntetiske forgasningsgasser. Naturgas er anvendt til sammenligning. Omdrejningstallet er 2250 rpm. Forsøgene er udført med Fordmotoren fra 100 kW forgasseren.



Der ses en virkningsgradsreduktion ved overgang fra naturgas til forgasningsgas ved omdrejningstallet 1500 RPM. Virkningsgradsreduktionen ved maksimal ydelse varierer fra ca. 0 til 15 % .

Reduktionen af den maximale akselydelse ved overgang fra naturgas til forgasningsgas er ret markant for nogle af forsøgsserierne og ikke for andre. Reduktionen ligger mellem 0 og 15 %.

En teoretisk metode til at udregne den forventede ydelse og virkningsgrad ved at skifte fra et velundersøgt brændstof til et nyt ses i ref. a-40. Anvendelse af denne metode ved overgang fra naturgas til forgasningsgas giver lidt for store reduktioner. Metoden er baseret på blandingsbrændværdien.

Forsøg med Deutzmotoren på Viking forgasningsanlægget har vist virkningsgrader på over 30% . Ydelsesreduktionen ved at gå fra naturgas til forgasningsgas er ca. 15%. Virkningsgradsreduktionen ved fuldlast var begrænset (0 – 5%).

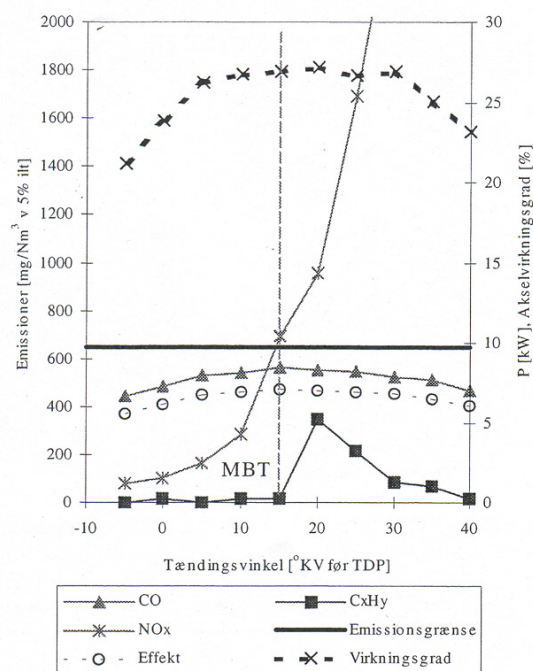
Det er for mange forskellige motorer vist, at forgasningsgas kan anvendes succesfuldt ved luftoverskudstal op til over 3. Ved anvendelse af naturgas bliver motorgangen ustabil dvs. der optræder hyppige tændingsudsættelser osv. ved luftoverskudstal over ca. 1,5.

Ydelsen reduceres med stigende luftoverskudstal, medens virkningsgraden holder sig høj over et forholdsvis stort område. Dette betyder, at der kan opnås høj virkningsgrad ved dellast af motorer på forgasningsgas. På figurerne 9.4, 9.5, 9.6 og 9.7 ses tydeligt forgasningssens fordel frem for naturgas på dette område.

### **9.1.6 Emissioner**

Emissionerne fra gasmotorer er et emne, der er omgærdet med en del diskussion. Specielt når det drejer sig om anvendelse af alternative brændsler, der netop anvendes for at begrænse forureningen.

Biomasseforgasningsgruppens forsøg med forgasningsgas i motorer viser, at det er forholdsvis let at overholde emissionskravene for UHC. Emissionskravene til CO kan ikke umiddelbart overholdes ved høje luftoverskudstal og emissionskravene til NO<sub>x</sub> er svære at overholde ved lave luftoverskudstal. (Se ref. a-70, a-79 og a-86). I ref. a-70 vises, at det er muligt at ændre tændingstidspunktet lidt væk fra det punkt, der giver højeste ydelse (MBT), uden at dette reducerer hverken ydelse eller virkningsgraden betydeligt. Herved kan emissionerne specielt af NO<sub>x</sub> reduceres betragteligt. På denne måde er det muligt at overholde alle grænseværdierne. (Se figur 9.8).



Figur 9.8 (Fra ref. a-70, figur 4.13). Effekt, emissioner og virkningsgrad som funktion af fortændingstidspunktet for et luftoverskudstal på 1,3. Der anvendes syntetisk forgasningsgas og omdrejningstallet er 1500 rpm. Forøg udført på Bukh-motor.

Det må dog nok påregnes, at CO grænseværdien ikke kan overholdes uden brug af oxidationskatalysator eller ved at hæve grænseværdien. Grænseværdien af CO skyldes, at CO emissioner ved anvendelse af traditionelle kulbrinteholdige brændsler er et udtryk for dårlig forbrænding og dermed emission af farlige, men svært målelige PAH forbindelser.

Ved forgasningsgas er det vist, at denne sammenhæng ikke eksisterer, og at CO her blot er et udtryk for ikke omsat brændsel. CO i sig selv er nemlig ikke noget særlig forurenende stof, om end det selvfølgelig ikke må indåndes. (Se ref. a-111).

### 9.1.7 Styring og regulering

Behovet for styring og regulering af en gasmotor er afhængigt af flere forskellige ting. F.eks. hvordan motoren er belastet og med hvilket formål, hvilket brændstof der anvendes og hvilke emissioner, der kan tillades. Herudover er styringen afhængig af opstart- og nedlukningsprocedurer, maksimal tilladelig ydelse og andre driftsforhold samt sikkerhedskrav.

De to mest anvendte generatortyper til vekselstrømsproduktion er synkrongeneratorer og asynkrongeneratorer.

Synkrongeneratoren kan arbejde såvel tilsluttet elnettet som ikke tilsluttet elnettet (ødrift). Når generatoren ikke er tilsluttet elnettet, skal en omdrejningsregulator på motoren styre frekvensen. Ved nettilslutning kræves en omdrejningsregulator på motoren for at kunne synkronisere generatoren til elnettets frekvens under opstart. Når

generatoren er nettilsluttet fastholder elnettet omdrejningstallet, og den effekt motoren producerer overføres til elnettet. Motorens omdrejningstal afhænger af antallet af poler i generatoren.

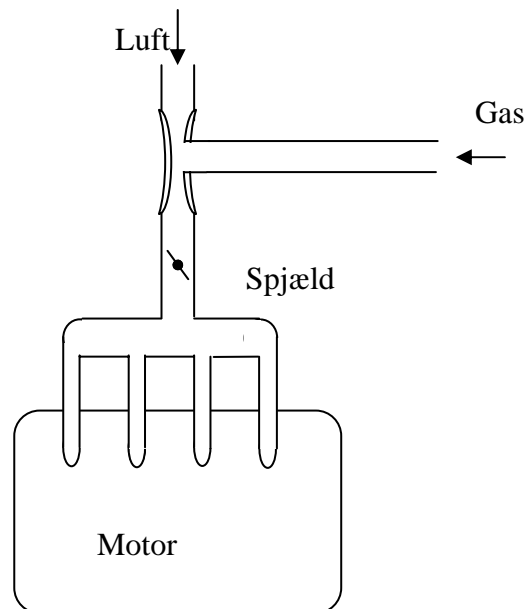
En asynkrongenerator skal altid under drift være tilkoblet et elnet, hvorved frekvensen fastholdes. Motorens omdrejningstal afhænger af antallet af poler i generatoren. Omdrejningstal antager en værdi, der er lidt større end svarende til netfrekvensen, idet der kræves et slip af hensyn til magnetiseringen. Asynkrongeneratorens elproduktion følger ydelsen fra motoren. Ved store motorer tilsluttet asynkrongeneratorer kræves en omdrejningsregulator i forbindelse med synkroniseringen.

Forsøgsmotorer, der driver en hvirvelstrømsbremse, fastholdes ved hjælp af bremsen på et fastlagt omdrejningstal. Bremsen måler belastningen, der altså bestemmes af motoren. Her kræves ingen omdrejningsregulator på motoren.

Der kan være forskellige krav til elproduktionen, f.eks. kan maksimal eleffekt ønskes hele tiden. Ønskes en given elproduktion, vil denne måles og regulere motorens ydelse ved justering af motorens spjæld.

En anden mulighed er, at et tilknyttet fjernvarmesystem stiller krav til variationer i motorens varmeproduktion og dermed til tilsvarende variationer i elproduktionen.

En motors ydelse (eller omdrejningstal) reguleres efter to forskellige principper. Enten det, der kaldes mængderegulering, eller det som kaldes kvalitetsregulering.

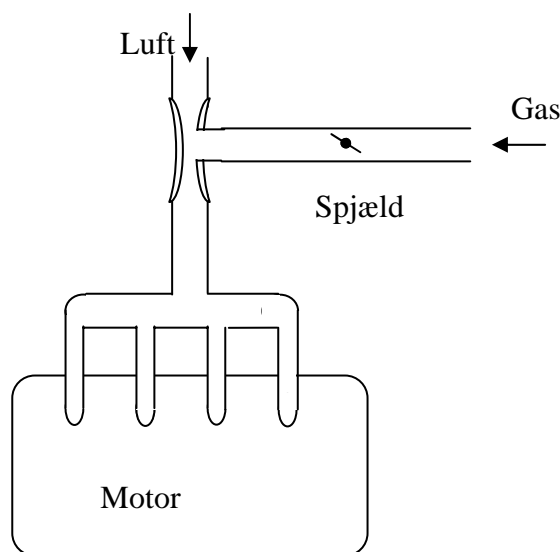


Figur 9.9 Skitse af gasmotor med mængderegulering.

Ved mængderegulering forstås at mængden af blandet luft og brændstof varieres f.eks. ved hjælp af et spjæld i indsugningssystemet. Mængderegulering indebærer at luft-brændstofforholdet kan holdes konstant under dellast, medens trykket i indsugningsmanifoldet vil variere. Mængderegulering anvendes i de fleste benzinmotorer til automobiler. (Se figur 9.9).

Ved kvalitetsregulering er lufttilgangen til motoren fri, idet det kun er brændstofftilførslen, der varieres. Dette betyder, at luft-brændstofforholdet varierer under varierende belastning, medens manifoldtrykket stort set er konstant.

Kvalitetsregulering anvendes i dieselmotorer, men kan også anvendes på gasmotorer. (Se figur 9.10).



Figur 9.10 Skitse af gasmotor med kvalitetsregulering

Ved kvalitetsregulering opnås som nævnt at trykket i indsugningsmanifoldet ikke falder, når belastningen falder, og dette resulterer i, at man ved kvalitetsregulering opnår væsentligt højere virkningsgrad ved dellast, end hvad der opnås ved mængderegulering.

Som det fremgår af ref. a-40, a-27 er naturgas ikke særligt egnet til kvalitetsregulering for ikke-trykladede motorer. Dette skyldes, at gassen hverken tænder eller brænder særlig godt ved høje luftoverskudstal. Til gengæld er det vist, at forgasningsgas har gode egenskaber ved høje luftoverskudstal, hvilket gør denne gas velegnet til kvalitetsregulering.

Reguleringssystemer, der kan betegnes som krydsninger mellem mængderegulering og kvalitetsregulering, kan anvendes. Her ændres såvel manifoldtryk som blandingsforhold under lastændringer.

### **9.1.8 Reguleringsmæssig sammenkobling af motor-generatoranlæg og gasforsyningsanlæg**

Ved levering af naturgas til stationære motorer anvendes traditionelt et gaskarbureringssystem, der består af en trykreguleringsventil og en venturidyse. Trykreguleringsventilen sørger for, at trykket i gasstrengen efter ventilen er konstant (tæt på atmosfæretryk) uanset gasflowet. Det forudsættes, at gassen tilledes fra et reservoir f.eks. naturgasnettet, hvori der er et nogenlunde konstant overtryk. Herefter blandes luft og gas i en venturidyse. Udover at opblende luft og gas sørger denne dyse for at fastholde blandingsforholdet mellem luft og gas, selv om flowet varierer. Stiger luftstrømmen reduceres trykket i dysen, og mere gas suges ind.

Blandingsforholdet kan justeres ved forholdet mellem dysens tværsnitsareal, og arealet i hullerne hvor igennem gassen strømmer, men kan også justeres ved hjælp af en ventil, der indsættes i gasstrømmen før dysen. Effekten reguleres med et spjæld i luft-gasblandingen.

fabrikat	Størrelse	Kompressionsforhold	Belastning
Briggs og Stratton	1 cylinder	Ca. 4,5 : 1	Asynkrongenerator
Ford VSG 411 (50 kW anlæg)	4 cylindre 1.117 liter	10,5 : 1	Asynkrongenerator
Fiat 127 (50 kW anlæg)	4 cylindre ca. 1 liter		Asynkrongenerator
Ford VSG 411 (100 kW anlæg)	4 cylindre 1.117 liter	9,5 : 1	Hvirvelstrømsbremse
Perkins 2006- SI (450 kW anlæg)	6 cylindre 12,4 liter	8,0 : 1	Synkrongenerator
Bukh forsøgsmotor. Ombygget dieselmotor	1 cylinder 0,48 liter	8,5 : 1 10,5 : 1 12,5 : 1 16,5 : 1	Hvirvelstrømsbremse
Deutz (Viking anlæg)	3 cylindre 3,5 liter	10 : 1	Asynkrongenerator

Tabel 9.1. Oversigt over motorer anvendt til forsøg med forgasningsgas i tilknytning af Biomasseforgasningsgruppen på DTUs aktiviteter.

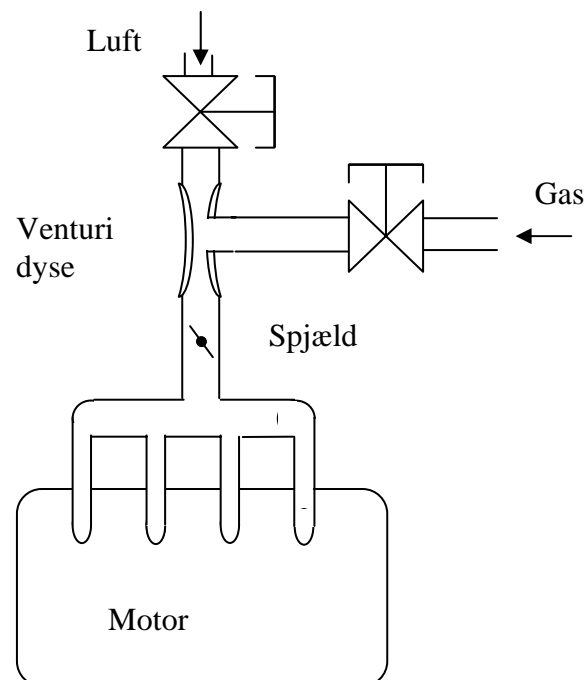
Ses på forsøgsanlæg, der er etableret af Biomasseforgasningsgruppen (se tabel 9.1) fremgår det, at kun Perkinsmotoren i Blære er tilsluttet en synkrongenerator.

Ved dette anlæg blev det besluttet at etablere en gasklokke, hvis indhold svarede til ca. 15 minutters forbrug. Dette var begrundet, dels i et ønske om at en langsom regulering af forgasseren skulle kunne accepteres, og dels i at gasklokken skulle fungere som opblandingstank, således at kvaliteten af den gas, der ledtes til motoren ikke varierede hurtigt. Herved var der etableret en god gaskilde med konstant tryk, og gassen ledtes herfra gennem en trykreguleringsventil til en håndreguleret ventil og en

venturidyse, hvor den blev blandet med luft. Spjældet i luft-gasblandingen blev aktiveret af motorens omdrejningsregulering, og styringen fungerede uden problemer. Hvis der produceredes mere gas end motoren forbrugte, kunne dette ledes til en fakkel. Planen var at koble tankens bevægelse til forgasserens styring, således at gasproduktionen afpassedes motorens aktuelle forbrug.

De øvrige forsøgsmotorer var tilsluttet asynkrongeneratorer eller hvirvelstrømsbremsere.

De fleste installationer var helt traditionelle, idet gassen tilledtes motoren fra et reservoir med konstant tryk, f.eks. en gasklokke. Ved etablering af håndreguleringsventiler i såvel luft- som gastilgangen, samt et håndreguleret spjæld i luft-gasblandingen var det muligt at simulere såvel mængderegulering som kvalitetsregulering ved alle belastninger. (Se figur 9.11).



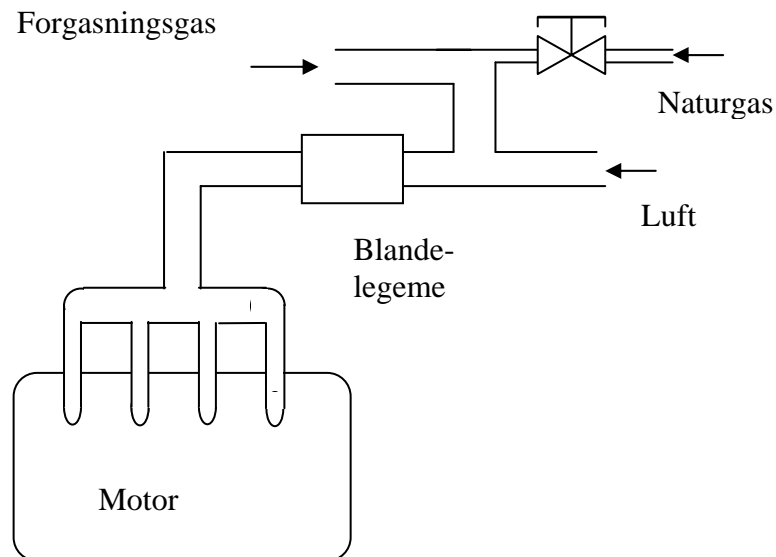
Figur 9.11 Skitse af gasmotor med håndreguleret brændstofførsel.

Ved etablering af Viking tottrinsforgasningsanlægget blev de indhøstede erfaringer fra de tidligere forsøgsanlæg anvendt til at designe et meget simpelt gaskarbureringssystem. (Se figur 9.12). Gas og luft blandes i et T- stykke. Gas-luftblandingen ledes herefter gennem et blandelegeme (Sulzer), hvor en god opblanding finder sted uden noget målbart tryktab. Gas- luftblandingen ledes herefter videre til indsugningsmanifolden.

Der kan tilledes enten forgasningsgas eller naturgas eller blandinger heraf. Naturgas doseres ved tryktab over en håndbetjent reguleringsventil og skal derfor justeres manuelt.

Forgasningsgassen tilledes i de mængder, der produceres.

Gasproduktionen kan styres på tre forskellige måder. Den ene består udelukkende i at lufttilsætningen til forgasseren sættes på en konstant værdi. Herved vil gassammensætningen og gasflowet variere en del som følge af pyrolysesneglens omdrejningshastighed, variationer i flisens fugtindhold osv.



Figur 9.12 Skitse af luft- og gassystemet på motoren til Viking forgasningsanlægget.

Den anden måde består i at gasblæseren, der er en volumetrisk maskine af Roots typen, kører med konstant omdrejningstal. Herved opnås at gasflowet til motoren bliver næsten konstant. Gassammensætningen og dermed brændværdien vil også her kunne variere lidt.

Den tredje måde består i, at en lambdasonde måler iltindholdet i motorens udstødningsgas. Signalet herfra indgår i styringen af gasblæserens omdrejningstal, således at iltindholdet i udstødningsgassen søges holdt konstant.

Alle tre reguleringsmåder fungerer tilfredsstillende. Den første giver meget varierende luftoverskudstal, den anden giver nogle variationer, medens den tredje giver helt konstante værdier af motorens luftoverskudstal. Den tredje egner sig fortrinlig til at dellaste motoren. Dellast ned til 1/3 last er gennemført med succes.

Forsøg med blanding af naturgas og forgasningsgas er gennemført med godt resultat.

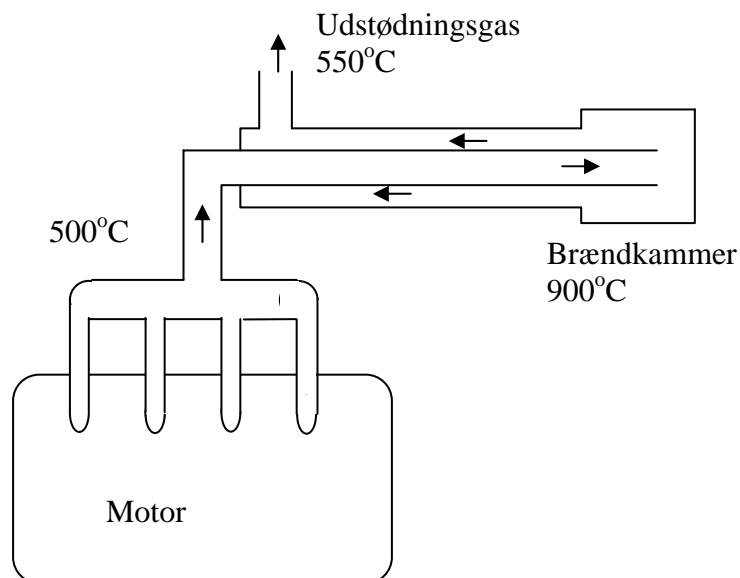
#### **9.1.9 Afledte aktiviteter**

Erfaringer med forgasningsgas viser, at kulbrinteemissionerne er forholdsmæssigt lave. Dette tilskrives brintens forbrændingsmæssige egenskaber. Da motorer, der anvender naturgas, har store problemer med emission af netop kulbrinter, er der gennemført undersøgelser med tilsætning af mindre mængder af brintholdige gasser

f.eks. forgasningsgas, til motorer, der anvender naturgas som energikilde. Resultatet er, at kulbrinteemissionen bliver reduceret væsentligt, sammenlignet med når motoren kører på ren naturgas.

En anden metode til at reducere kulbrinteemissionen fra naturgasfyrede motorer er at opvarme udstødningsgassen til ca. 800 °C. Herved reduceres såvel CO som kulbrinteemissionerne til næsten ingenting, samtidig med at NO<sub>x</sub> emissionen forbliver lav. Opvarmningen sker ved en varmeveksling, hvor udstødningsgassen veksles med sig selv. I et brændkammer placeret mellem varmevekslerens to sider opnås en temperaturstigning svarende til temperaturdifferencen over veksleren ved at afbrænde udstødningsgassens indhold af uforbrændte bestanddele. (Se figur 9.13).

Et system svarende til dette er patentanmeldt af en privat virksomhed.



Figur 9.13 Skitse af system til at reducere emissionerne af uforbrændte bestanddele i udstødningsgassen fra en motor.

#### **9. 1. 10 Andre studier.**

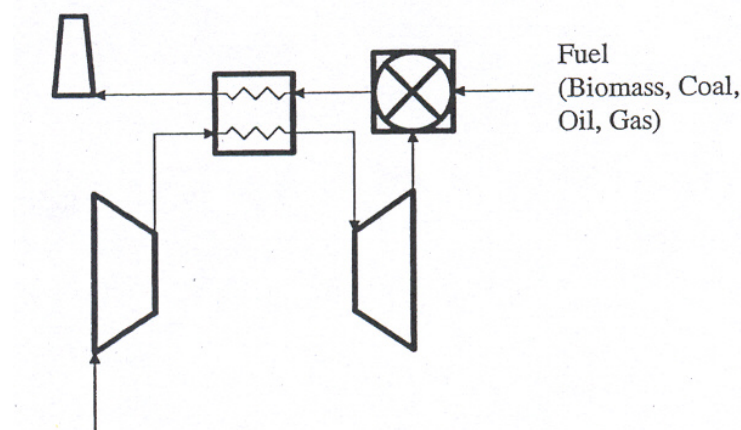
Der er gennemført studier af forbrændingen i en motor af brændstoffer bestående af ren naturgas, ren forgasningsgas, gasblandinger af naturgas og forgasningsgas, samt forgasningsgas hvor CO indholdet er erstattet af kvælstof.

Resultaterne giver et indblik i forbrændingsprocesserne i motorens brændkammer. Endvidere viser studierne, at når forgasningsgas anvendes som brændstof er CO i udstødningsgassen udtryk for uforbrændt brændstof og ikke for dårlig forbrænding af kulbrinter. (Se ref. a-105, a-84)



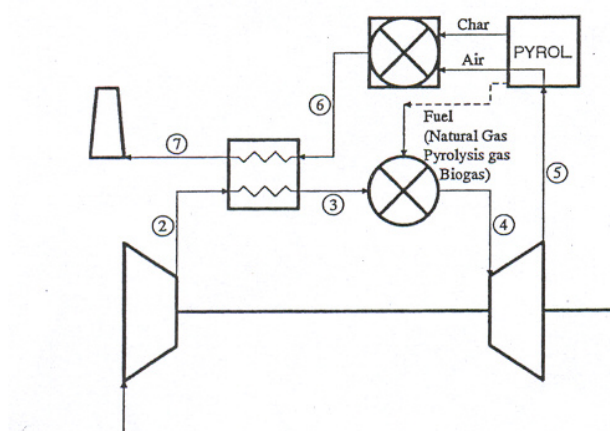
### 9. 1. 11 Indirekte fyrede gasturbiner

Indirekte fyrede gasturbiner (IFGT) er velegnede til at anvende brændsler, der ikke er rene nok til, at forbrændingsprodukterne kan ledes gennem turbinen. I stedet kan forbrændingsprodukterne i en varmeveksler afgive sin varme til et rent medie, der anvendes i turbinen. Hovedproblemet er at finde materialer, der kan modstå høj temperatur i denne veksler. På figur 9.14 ses en skitse af en simpel indirekte fyret gasturbine.



Figur 9.14 (Fra ref. a-85, figur 1). Principskitse af simpel indirekte fyret gasturbine (IFGT).

På figur 9.15 ses et mere avanceret system. Med sigte på at anvende forgasningsgas enten som hele energitilførslen eller til dele heraf er der gennemført energisystemundersøgelser ved hjælp af modellering. Der er gennemført undersøgelser af koblingen mellem indirekte fyrede gasturbiner og et netværk af varmevekslere og forbrændingskamre, hvori forgasningsgas og andet brændsel er brændt. Det er vist, at ved små anlæg er den indirekte fyrede gasturbine attraktiv også med hensyn til virkningsgrad. Ved kobling til systemer, der også indebærer tørring kan yderst fordelagtige virkningsgrader opnås. (Se ref. a-50, a-85, a-91, a- 93, a-94, a-104, b-21, b-22 og b-23).



Figur 9.15 (Fra ref. a-94, figur 6). Principskitse af indirekte fyret gasturbine med supplerende indfyring af "rent" brændsel.

## **9.2 Tilsatsfyring til kraftværkskedler**

For at reducere CO<sub>2</sub> emissionen til atmosfæren ønskes at biomasse, primært halm, skal substituere dele af fossile brændsler anvendt i kraftværker.

Dette kan ske ved anvendelse af biomasse i separate kedler eller ved tilsatsfyring til kedler, der anvender fossile brændsler. Fyring med biomasse giver en række problemer. De væsentligste er risiko for belægninger og korrosion pga. biomassens indhold af klor og alkalimetall. Korrosionen er voldsomst i de varmeste metaldele dvs. primært i overhedere. Herudover kan sammenblanding af biomasseaske og aske fra det fossile brændsel kul give problemer med askeanvendelsen.

Ovennævnte problemer kan reduceres væsentlig ved forbehandling af halm i en termisk proces. Herved kan klor, alkalimetaller og andre askebestanddele forhindres i at komme ind i kraftværkskedlen.

Under biomasseforgasningsgruppen er der arbejdet med pyrolyseprocesser og forgasningsprocesser med sigte på en sådan forbehandling af halm.

### **9.2.1 Pyrolyse**

Ved en pyrolyse af halm til mellem 450 og 650 °C afgives ca. halvdelen af halmens brændværdi som flygtige bestanddele. Hovedparten af de uorganiske bestanddele, også klor og alkalimetaller, bliver tilbage i koksen.

I forbindelse med at Reto Hummelshøj, COWI vandt en idekonkurrence om energiteknologi hos Elkraft, blev der indgået samarbejde mellem DTU, COWI og Elkraft. Ideen gik ud på at etablere en pyrolyseenhed i forbindelse med ristefyrede halmkedler. De flygtige bestanddele fra pyrolysen skulle anvendes til indfyring i en separat overheder, og koksen indfyres på risten sammen med halm. I den pyrolyserede halm forventedes en tilbageholdelse på 80-90 % af de skadelige stoffer i koksen, således at overhederen kun ville blive udsat for begrænsede koncentrationer af disse skadelige stoffer.

Samarbejdet gik ud på at udvikle en pyrolyseenhed til dette formål.

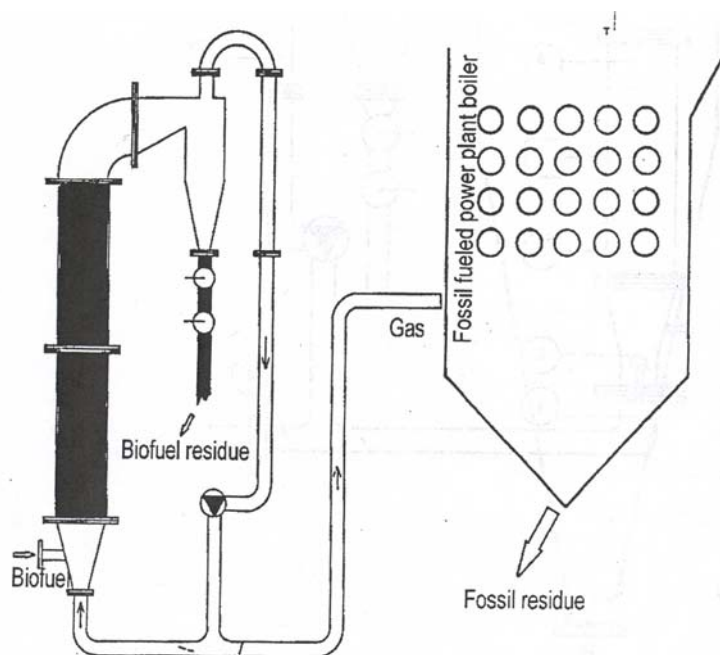
Der blev taget udgangspunkt i erfaringerne fra tottrinsforgasseren, hvor pyrolyseenheden bestod af et eksternt opvarmet rør, hvorigennem halm blev presset ved hjælp af en stempelindfoder. Ved opskalering af dette system opstod problemer med tilstopning af røret. I forbindelse med udvikling af tottrinsforgasseren (50 kW anlægget) viste det sig, at etablering af langsgående glideskinner indvendigt i pyrolyserøret kunne afhjælpe tilstopningsproblemerne. (Se bilag 3). Tiltroen til at dette princip kunne opskaleres til kraftværksstørrelse svandt, og en løsning, hvor halmen fremføres gennem en eksternt opvarmet pyrolysereaktor ved hjælp af en snegl, blev konstrueret.

Efter løsning af visse problemer med udtagning af koksen fungerede dette system udmærket. Der blev konstrueret en enhed, hvor de flygtige bestanddele blev afbrændt. I denne enhed blev forholdene i en overheder simuleret ved hjælp af et brændkammer tilknyttet en luftkølet varmeveksler med indbyggede overhederrør i forskelligt materiale. Alkali- og klorindholdet blev målt. Overhederrørene blev eksponeret for afbrændte flygtige pyrolyseprodukter i ca. 500 timer.

Resultaterne var positive, og et egnet overhedermateriale blev fundet.

Et anlæg indeholdende pyrolyseenhed og overheder blev konstrueret og tilknyttet Haslev kraftvarmeværk. Drift med dette anlæg viste, at processen virkede efter hensigten.

Der er på laboratoriet foretaget undersøgelser af en fluid bed baseret ekstern opvarmet pyrolyseenhed. (Se figur 9.16). Resultater viste, at man i forhold til en sneglebaseret fixed bed reaktor må reducere temperaturniveauet for at få en tilsvarende tilbageholdelse af klor og alkali. Energiindholdet i den flygtige fraktion reduceres ikke herved. (Se b-1, a-33, a- 36, a-37, a-43 )



Figur 9.16 (Fra ref. a-43, figur 3). Skitse af fluidbedbaseret pyrolyseenhed med tilsatsfyring af de flygtige pyrolyseprodukter til kraftværkskedel.

Anvendelse af pyrolyseprocesser på denne måde kræver, at der er anvendelse for koksresten f.eks. ved indfyring på en rist. Ved kulkraftværker er der ikke direkte anvendelsesmuligheder for koksen, og forgasningsprocesser er måske her mere interessante.

### **9. 2. 2 Forgasning**

Det viser sig efterhånden at direkte tilsatsfyring i kulfyrede kraftværkskedler med små mængder halm (0-10%) ikke giver anledning til store problemer. Ønskes større halmandel kræves, at væsentlige dele af de skadelige stoffer tilbageholdes.

For at undersøge status og muligheder for at anvende forgasning i forbindelse med tilsatsfyring, blev en litteraturundersøgelse iværksat i samarbejde med Peder Stoholm, DFBT. Undersøgelsen behandler erfaringer på området. Herudover behandles systematisk forskellige muligheder for indpasning af pyrolyse- og forgasningsprocesser i kraftværker i tilsatsfyringsøjemed.

I ref. a-44 fremhæves to muligheder. Den ene anvender højtemperaturforgasning og efterfølgende lavtemperaturrensning af gassen for skadelige stoffer. Ved dette system vil hovedparten af klor og alkalimetaller frigøres fra brændslet i forgasseren, men kan indfanges ved lav temperatur, idet det forventede tjæreindhold i gassen her er relativt lavt. En væsentlig ulempe ved denne proces er risiko for sintring og agglomering i forgasseren. Den anden mulighed er anvendelse af en lavtemperatur forgasning og en efterfølgende højtemperatur gasrensning. Ved dette system tilbageholdes væsentlige mængder af alkali og klor i forgasseren. Gassen må efterfølgende renses ved høj temperatur pga. det forventelige høje tjæreindhold som følge af den lave forgassertemperatur.

Højtemperaturforgasningsløsningen vurderedes at ligge tættest på et kommercielt stade.

Elkraft, VTT og Foster Wheeler gennemførte i Finland forsøg med halmforgasning i en traditionel cirkulerende fluidbedforgasser. Gassen blev efterfølgende renses for alkalimetaller og klor så den kunne anvendes i en kraftværkskedel.

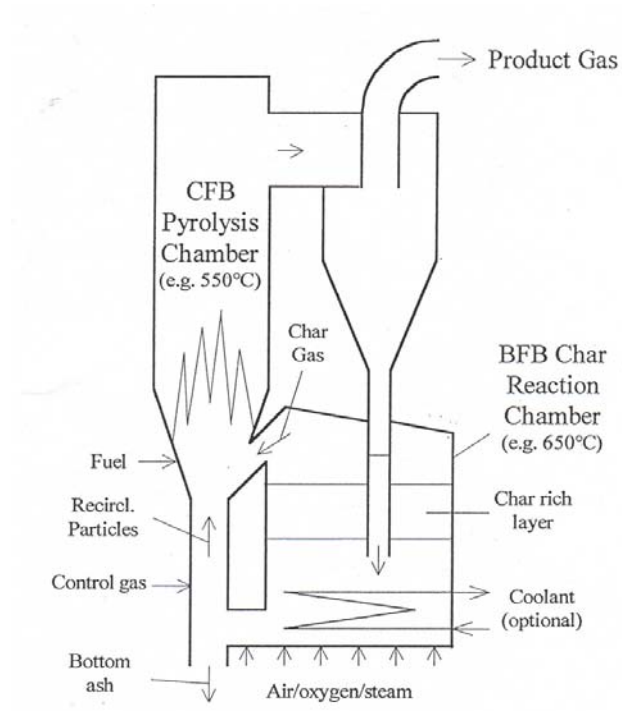
Forgasningen foregik ved over 900 °C, og det var påkrævet at anvende additiver for at undgå sintring. Systemet fungerede tilfredsstillende, men et af de tilbageværende problemer var uomsat kulstof i asken.

Under litteraturstudiet kunne Peder Stoholm ikke undgå at få ideer om at kombinere pyrolyse og lavtemperaturforgasning af koksresten. Herved ville man kunne opnå, at væsentlige dele af de skadelige uorganiske bestanddele i halmen kunne tilbageholdes i forgasseren og udtages eller udrenses af gassen ved hjælp af cykloner.

På baggrund af disse ideer blev et polyteknisk midtvejsprojekt stablet på benene med et økonomisk tilskud fra CO2 ordningen. Der blev opbygget et forsøgsanlæg på 50 kW indfyret effekt. Processen fik navnet: "Lavtemperatur cirkulerende fluidbedforgasser" (LT-CFB) og er patentanmeldt. (Se ref. p-3).

Processen er vist på figur 9.17. Biomasse indføres i pyrolyseenheden, der er en cirkulerende fluidbed. Energiforsyning hertil kommer med sand og gas fra koksfor-gasseren. Gassen ledes ud gennem primærcyklonen hvor sand og koks separeres og ledes til koksfor-gasningsreaktoren, der er en boblende fluidbed. Luft og vanddamp tilføres koksfor-gasningsreaktoren og koksen for-gasses.

Forgasningsreaktionerne er varmeudviklende på grund af, at primært luft anvendes som for-gasningsmiddel. Gassen renses i en sekundærcyklon (ikke vist på figur 9.17) for restkoks og fine askepartikler. De indledende forsøg viste, at processen kunne realiseres, og den syntes enkel at styre og regulere. Den maksimale temperatur fås i koksfor-gasningsreaktoren, og denne var omkring 700 °C. (Se ref. b-9, b- 15, a-54, a-60, a-61, a-68).



Figur 9.17 (Fra ref. a-54, figur 1). Principskitse af lavtemperatur cirkulerende fluidbedforgasser (LT-CFB).



Figur 9.18 Foto af det nye 500 kW LT-CFB forgasningsanlæg under montagen på DTU.

Samarbejdet blev udvidet med Ricatec, dk-Teknik og TechWeis. Efterfølgende forsøg viste, at der kunne opnås en tilbageholdelse af alkalimetaller på op mod 90%, og for klor var tilbageholdelsen lidt mindre. Efter optimering af forsøgsanlægget blev kulstofabet reduceret til under 1,5%, hvilket var væsentligt under det niveau, der blev opnået med det før omtalte forsøgsanlæg, der baseredes på traditionel cirkulerende fluidbed teknologi i Finland. Det blev demonstreret, at et stabilt koncentrationsniveau af kalium kunne opnås i koksreaktoren. (Se ref. a-96, b-18).

Det blev besluttet at opskalere processen og et anlæg på 500 kW (indfyret) er under opførelse på DTU (Se figur 9.18).

PSO - Eltra yder økonomisk tilskud til udviklingen. (Se ref. a-110).

## **10. Ulrik Henriksens bidrag til det præsenterede arbejde.**

I dette afsnit forklares hvilken rolle, jeg har haft i det præsenterede arbejde.

Som tidligere nævnt består afhandlingen af nærværende sammenfatning samt de 11 bilag.

### **10.1 Nærværende sammenfatning**

Nærværende sammenfatning af aktiviteterne under Biomasseforgasningsgruppen er frembragt og skrevet af Ulrik Henriksen.

### **10.2 Gennemgang af bilag**

Bilag 1:

Pyrolyse og forgasning af halm. Delrapport 4.  
Eksperimentel og beregningsmæssig undersøgelse af forhold ved pyrolyse og forgasning af halm.

Ulrik Henriksen har stået for planlægning og opbygning af forsøgsopstillingerne samt har gennemført forsøgene. Ulrik Henriksen har opbygget de matematiske modeller og har gennemført beregningerne. Ulrik Henriksen har foretaget databehandling, usikkerhedsbestemmelse og resultatpræsentation og har forestået diskussion af forsøg og resultater.

Ulrik Henriksen har skrevet rapporten.

Bilag 2 :

Mass and Energy Distribution of the Pyrolysis Products from Straw.

Denne artikel præsenterer resultater fra masse- og energifordelingen ved pyrolyse af halm. Artiklen bygger på samme resultater som publiceret i bilag 1.

Ulrik Henriksen har stået for planlægning og opbygning af forsøgsopstillingerne, samt har gennemført forsøgene. Ulrik Henriksen har foretaget databehandling, usikkerhedsbestemmelse og resultatpræsentation og har forestået diskussion af forsøg og resultater.

Bilag 3:

50 kW-forgasseren.

Ulrik Henriksen har konstrueret forgasseren og målesystemet. Ulrik Henriksen har gennemført præliminære forsøg med gasrensning,

Ulrik Henriksen har opstillet de beregningsmæssige udtryk og foretaget de simuleringsmæssige beregninger.

Ulrik Henriksen har skrevet rapporten bortset fra de afsnit der omhandler motorforsøgene og bortset fra appendix 2. Ulrik Henriksen har bidraget væsentligt til planlægning, gennemførelse af forsøgskørsler samt til resultatfortolkningen.

## Bilag 4:

Gasification of Straw in a Two-Stage 50 kW Gasifier.

Denne artikel sammenfatter væsentlige resultater fra undersøgelsen, der også er rapporteret i bilag 3.

Ulrik Henriksen har skrevet artiklen og har præsenteret den mundtligt ved konferencen, hvor den blev publiceret.

## Bilag 5:

Relationship between Gasification Reactivity of Straw Char and Water Soluble Compounds present in this Materials.

Ulrik Henriksen har fået ideen til denne undersøgelse og har skaffet økonomiske midler hertil. Herudover har Ulrik Henriksen planlagt arbejdet og forestået forsøgsgennemførelse og resultatfortolkning. Ulrik Henriksen har skrevet artiklen.

## Bilag 6:

Teoretiske betragtninger vedrørende termiske forhold i en makro TGA forsøgsreaktor.

Ulrik Henriksen har initieret og formuleret projektet, har gennemført arbejdet og skrevet rapporten.

## Bilag 7:

Optimized Two-Stage Gasifier.

Ulrik Henriksen har initieret og formuleret undersøgelsen og har skaffet økonomiske midler hertil.

Ulrik Henriksen har konstrueret forgasseren, der er anvendt til forsøgene og har haft den overordnede ledelse af forsøgskørslerne. Ulrik Henriksen har initieret og konstrueret de ændringer i forgasserens udformning, som ledte til den optimering af forgasseren, der er sket mellem de to beskrevne forsøgsserier. Ulrik Henriksen har bidraget til resultatfortolkningen.

## Bilag 8:

High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier.

Ulrik Henriksen har initieret og formuleret undersøgelsen og har skaffet økonomiske midler hertil.

Ulrik Henriksen har konstrueret forgasseren, der er anvendt til forsøgene og har haft den overordnede ledelse af forsøgskørslerne. Ulrik Henriksen har initieret og konstrueret de ændringer i forgasserens udformning, som ledte til den optimering af forgasseren, der er sket mellem de to beskrevne forsøgsserier. Ulrik Henriksen har bidraget til resultatfortolkningen.



**Bilag 9:**

Forenklede betragtninger vedrørende tryktab og koksstruktur i fixed-bed forgasningsreaktorer.

Ulrik Henriksen har initieret og formuleret projektet, har gennemført arbejdet og har skrevet rapporten.

**Bilag 10:**

Heat Transfer in a Fixed Bed of Straw Char

Ulrik Henriksen har i samråd med de øvrige forfattere ledet undersøgelsen.

Ulrik Henriksen har bidraget med hyppige drøftelser med Jan Fjellerup til forsøgsplanlægning, og forsøgsudstyrsopbygning.

Ulrik Henriksen har fundet på, at der skulle opstilles en bedmodel der skulle kombineres med Yagi og Kuniis varmetransportmodel. Ulrik Henriksen har opstillet formelen, der sammenkobler den karakteristiske længde og bedporøsiteten.

Ulrik Henriksen har bidraget til resultatfortolkning.

**Bilag 11:**

The Design and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifier

Ulrik Henriksen har startet aktiviteten og har skaffet økonomiske midler hertil.

Ulrik Henriksen har gennem mange år forestået de aktiviteter, der har ledt til denne tottrinsforgasser. Ulrik Henriksen har designet og konstrueret denne tottrinsforgasser og har ledet opbygning af anlægget. Ulrik Henriksen har designet styringsstrategi og målesystem. Ulrik Henriksen har forestået indkøring af anlægget og har planlagt forsøgskørslerne. Ulrik Henriksen har forestået materialeundersøgelserne.

Ulrik Henriksen har bidraget væsentligt til forsøgskørsel og resultatfortolkning.

Ulrik Henriksen har skrevet artiklen og har præsenteret det mundtligt ved konferencen, hvor den blev præsenteret.

**10.3 Andre bemærkninger**

Det kan generelt siges, at jeg har bidraget til alle områder af Biomasseforgasningsgruppens arbejde. Jeg har bidraget med vejledning af studerende og med ledelse af aktiviteterne. Ledelsen indebærer, udover projektledelse, fastlæggelse af den overordnede strategi for gruppens forskning, og udvælgelse af de forskningsaktiviteter der skal søges om økonomisk støtte til at gennemføre.

Af patentanmeldte opfindelser har jeg opfundet hvirvelstrømsforgasseren og er medopfinder til tre andre opfindelser (se referencegruppe p).

Jeg har designet og konstrueret gruppens fixed-bedbaserede tottrinsforgassere og har bidraget væsentligt til de fluidbedbaserede. Jeg har fastlagt styrestrategier for dem alle bortset fra LT-CFB forgasseren.

Udover de egentlige forgassere har jeg designet og planlagt bygningen af en række laboratorieopstillinger (bl.a. Makro- TGA udstyret og pyrolyseudstyret omtalt i bilag 1), og har bidraget væsentligt ved opførelse af gruppens andre laboratorieopstillinger.

For alle de eksperimentelle aktiviteter har jeg bidraget til indkøring, måling, kalibrering, fejlfinding, forsøgsplanlægning, forsøgsgennemførelse og resultatfortolkning.

Inden for det teoretiske område har jeg, som det fremgår ovenfor, gennemført en række aktiviteter selv. Derudover har jeg til de fleste andre af disse aktiviteter bidraget til planlægning, metodevalg, fejlfinding, gennemførelse og resultatfortolkning.

Inden for motorområdet har min indsats været mindre.

Siden 2001 har ledelsen af fire modelleringsprojekter påhvilet Torben Kvist Jensen og Benny Gøbel.

## **11. Sammenfatning og konklusion**

Denne afhandling behandler aktiviteter, der er gennemført under Biomasse-forgasningsgruppen fra sidst i firserne og til og med 2003. Dette gøres ved at give en sammenfatning af de samlede aktiviteter. Nogle aktiviteter er fremhævet, og bilag inden for disse er udvalgt og vedlagt. Nærværende sammenfatning og de udvalgte 11 bilag udgør afhandlingen.

### **Forgasning sigtende på decentral kraftvarme:**

Totrinsforgasseren er udviklet fra indledende laboratoriestudier sidst i firserne til i dag, hvor der er gennemført over 2000 drifttimer og med fuldautomatisk, ubemandet drift. Der er opnået en virkningsgrad fra biomasse til leveret el på 25%, hvilket for anlæg under 100 kW måske er verdens højeste.

Det er lykkedes at udvikle en forgasningsproces, der producere en gas med ekstremt lavt tjæreindhold.

Udviklingsforløbet har indbefattet opbygning af 11 forsøgsanlæg, hvor de første var små laboratorieforgassere og de senere var anlæg på knap 100 kW indfyret, bortset fra en der var på ca. 400 kW indfyret. Gennem forsøg med disse anlæg er der opnået en betragtelig erfaring og indsigt i en række forhold. De opnåede resultater dokumenterer at totrinsforgasningsprocessen producerer en gas med et ekstremt lavt tjæreindhold.

Det er vist, at totrinsforgasseren hurtigt kan reguleres op og ned i last. Det er vist, at høj energivirkningsgrad og høj elvirkningsgrad kan opnås såvel ved fuld last som ved dellast. Velegnede konstruktionsmaterialer er fundet.

Det er erkendt, at tjærenedbrydning internt i en forgasser (totrinsforgasseren) er yderst effektivt. Praktiske problemer f.eks. vedrørende tilstopning og brændselsindfødning er løst. Forbedring af energivirkningsgraden er opnået bl.a. ved anvendelse af resultater fra de etablerede beregningsmodeller.

En simpel forgasser Hvirvelstrømsforgasseren, der er baseret på totrinsprocessen er demonstreret.

### **Generelle emner:**

Ved anvendelse af den gennemførte grundlæggende forskning (generelle emner) er der opnået forståelse af forhold tilknyttet forgasning og relaterede processer.

Dette har bl.a. ført til erkendelse af at tjærenedbrydningen i totrinsforgasseren sker i to trin, nemlig såvel i den partielle oxidationszone som ved passage gennem koksbedden. Dette er opnået i nær tilknytning til optimeringen af forgasser-konstruktionen.

Masse og energifordeling ved pyrolyse af halm er undersøgt.

Askens indhold af uorganiske bestanddele er undersøgt med hensyn til sintring og agglomerering, men også de uorganiske bestanddeles indflydelse på koksreaktiviten er undersøgt. Kontrol af askeegenskaberne bl.a. ved additivtilsætning har ført til, at agglomerering og sintring kan undgås også ved forgasning af halm.

Varmeledningsevnen i en bed bestående af koks fra strå (halm) er undersøgt, og en udvidelse af de oprindelige modeller er gennemført, således at anvendeligheden er forbedret ved modellering bl.a. af risteforbrændingsanlæg.

Matematisk modellering af koksbeds er lavet på forskellige niveauer. Det er vist at modeller baseret på masse- og energibalance, lokal kemisk ligevægt i gasfasen, udtryk for koksreaktivitetens og varmeledningsevnen kan give god overensstemmelse med

forsøg i en makro-TGA reaktor. Denne erkendelse har ført til modellering af koksbeds i egentlige forgassere.

Indledende teoretiske beregninger af tryktabsforhold i en koksbed er gennemført, og på denne baggrund er videre undersøgelser gennemført.

Resultater fra de generelle forskningsmæssige undersøgelser er anvendt i de opbyggede modeller. Disse modeller er bl.a. brugt til at finde driftmæssige muligheder og begrænsninger, men også til at finde optimeringspotentialer. Disse værktøjer er anvendt ved forbedring af tottrinsforgasseren og er en medvirkende årsag til den opnåede høje energivirkningsgrad og elvirkningsgrad.

#### Øvrige aktiviteter:

Det er vist at forgasningsgas fra tottrinsprocessen er et godt brændstof for gasmotorer, og at regulering af disse ved hjælp af kvalitetsregulering giver en høj dellastvirkningsgrad.

Der er i samarbejde med Danish Fluid Bed Technology (DFBT) frembragt en meget perspektivrig proces LT-CFB processen. Denne har vist gode resultater sigtende på tilsatsfyring af ”vanskelige” biomassebaserede brændsler til kraftværkskedler.

#### Overordnede betragtninger:

Tottrinsforgasningsprocessen eller trinopdelt forgasning, som den også kaldes, har ført til at andre end DTU arbejder med udvikling af teknologi, der baserer sig på denne proces. Dette i såvel Danmark som i udlandet.

Der kan konstateres international interesse for tottrinsforgasseren. Det Europæiske GAS-NET samarbejde har ud af alle forgasningsprojekter i Europa udvalgt Vikingforgasseren sammen med 5 andre forgassere til at indgå i en publikation med succeshistorier inden for dette område.

Resultater opnået vedrørende tjærenedbrydningen internt i forgassere har vakt interesse internationalt og har sat spor i den videnskabelige litteratur.

Der har gennem alle årene været en yderst ambitiøs målsætning om at være blandt de bedste i verden og frembringe de bedste forgassere og forgasningsprocesser.

Det er vist, at et snævert sammenvævet forløb af forskningsaktiviteter og udviklingsaktiviteter gennem mange år kan føre til dette.

Resultaterne opnået under Biomasseforgasningsgruppen er formidlet til andre aktører dels ved videnskabelige publikationer og fremlæggelse ved konferencer, og dels ved support til stort set alle projekter inden for forgasserudvikling i Danmark. Spin- off effekter ses i forbindelse med problematikker indenfor fyring med biomasse i kraftværkskedler og anvendelse af naturgas i gasmotorer.

#### Overordnet konklusion:

Alt i alt må det sluttes at det oprindelige formål fra sidst i firserne er opfyldt.

Løsninger på tjæreproblemet og askeproblemerne er fundet.

Samtidig har en væsentlig videnopbygning inden for området fundet sted.

## **12. Visioner**

Som en del af det her rapporterede arbejde er der udviklet en forgasningsproces, der betegnes tottrinsprocessen. Denne proces har ført til yderst positive resultater med forgasning af biomasse og anvendelse af gassen til kraftvarmeproduktion ved hjælp af stempelmotorer.

Den lave tjæremængde i den producerede gas giver mulighed for procesoptimering og høj energivirkningsgrad.

Totrinsprocessen kan producere en gas, der har et forholdsvis højt indhold af brint. I modsætning til hvad der blev troet tidligere, har det vist sig, at dette er en stor fordel, når gassen skal anvendes til motorbrændstof. Man kan herved opnå bedre forbrænding og køre med højere kompressionsforhold sammenlignet med f.eks. naturgas eller en række andre typer forgasningsgasser.

Emissionsmæssigt ser det ud til, at der bliver mulighed for at kunne overholde grænseværdierne uden brug af dyrt røggasrensningssudstyr. Samtidig ser det ud til, at i stedet for ombyggede naturgasmotorer kan enkle og billige motorløsninger baseret på ombyggede dieselmotorer, født med højt kompressionsforhold, anvendes til denne gas.

Ved anvendelse af gas fra tottrinsprocessen viser det sig, at motorens virkningsgrad ikke reduceres væsentligt. Specielt opnås meget høj dellastvirkningsgrad.

Som det har fremgået, har en række forhold vist sig væsentlig mere positive end egentlig forudset.

På grund af det enkle gasrensningssystem må det konkluderes, at tottrinsforgasseren er en enkel proces sammenlignet med andre forgasningsprocesser. Faktisk er også selve forgasningsanlægget ret enkelt sammenlignet med andre forgassere. Dette skyldes primært at forholdene i tottrinsforgassere er veldokumenterede og velkontrollerede under drift. Dette gælder også for temperaturfordelingen og den lokale gassammensætning, og derfor er det kun nødvendigt at konstruere en meget lille del af forgasningsreaktoren til at kunne modstå høj temperatur og korrosiv atmosfære.

Det er derfor min vurdering, at tottrinsprocessen har væsentlige fordele - både med hensyn til effektivitet og pris - sammenlignet med andre forgasningsprocesser.

Fremtidsmulighederne for forgasning af biomasse er imidlertid svære at forudsige. I Danmark ser det ikke alt for lyst ud i øjeblikket, men til gengæld er der lovende markedsudsigter i andre europæiske lande. På længere sigt tror jeg også, at lande som f.eks. Indien og Kina vil anvende termisk forgasning af biomasse til el-produktion. Man skal nemlig huske, at forgasningsanlæg generelt har den fordel frem for en række andre teknologier, at selv for små anlæg kan en relativ høj virkningsgrad opnås. Dette gælder i særlig grad for tottrinsprocessen.

Ud fra disse betragtninger og ud fra de udsagn andre førende eksperter inden for området fremfører i forskellige sammenhænge om tottrinsforgasserens potentiale, er det min vurdering, at når der tales om mindre forgasningsanlæg, så vil forgassere baseret på tottrinsprocessen fremover blive de dominerende globalt set.

Det er således mit håb, at se noget der ligner ”vindmølleeventyret” gentage sig for mindre tottrinsforgassere.

Som tidligere beskrevet foregår der i øjeblikket implementering af tottrinsprocessen ved hjælp af fluidbedteknologi sigtende på store forgasningsanlæg på mange Megawatt.

Disse aktiviteter er ikke så langt fremme som tottrinsforgasseren i fixedbed versionen (Viking mm). Det er derfor svært at forudsige, hvorledes denne udvikling vil forløbe, men forhåbningen til, at der også i stor skala vil være klare fordele ved at producere gas med lavt tjæreindhold, synes oplagt.

Inden for forgasning sigtende på tilsatsfyring af vanskelige brændsler (halm, gylle, mm) til kraftværkskedler eller forgasning sigtende på varmeproduktion, vil det nok være andre forgassertyper, der vil blive interessante.

På dette område findes en række muligheder, og en række teknologier i stor skala udbydes til salg.

Alligevel er det min vurdering, at den proces der arbejdes med i Biomasse-forgasningsgruppen til disse formål, LT-CFB processen, har åbenlyse fordele. Disse er relateret til den forholdsvis lave procestemperatur, som betyder, at der undgås en række klassiske problemer vedrørende sintring, agglomerering og frigivelse/indfangning af alkali og klor.

Det er min vurdering, at denne proces har potentialet til at kunne blive udviklet til en af de førende i verden.

Skues langt ud i fremtiden kan man ikke undgå at beskæftige sig med produktion af flydende brændsel og måske også brint. Termisk forgasning af biomasse vil være interessant i forbindelse med produktion af disse produkter, og forgasningsprocesser, der har høj virkningsgrad, højt brintindhold og lavt tjæreindhold i gassen, vil også her have store fordele.

For at realisere de visioner, jeg har udstukket ovenfor, kræves fortsat teknologisk udvikling og demonstration fulgt op af procesunderstøttende forskning.

Det er således min konklusion, at det gennemførte arbejde, som denne afhandling omhandler, har lagt grunden for en række teknologier, der har et stort potentiale inden for flere anvendelser i verdens energisystemer fremover.

### **Liste over referencer**

Referencerne er opdelt i fire grupper:

a : Alle publikationer udgivet af Biomasseforgasningsgruppen.

b: Studenterrapporter udarbejdet i tilknytning til Biomasseforgasningsgruppen.

c: Andre referencer.

p: Patenter.

### **Referencegruppe a (Publikationer udgivet af Biomasseforgasningsgruppen)**

- a-1) Gaskedel. 2-trins kedelanlæg til gasproduktion.**  
Ulrik Henriksen, Jesper Schramm, Erik Kofoed.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 88-2. 20 pages. 1988.
  
- a-2) Pyrolyse og forgasning af halm. Delrapport 1.**  
**Indledende forsøg og beregninger.**  
Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Gitte Olsen, Poul Holst Pedersen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 89-3. 30 pages. 1989.
  
- a-3) Gasification and Pyrolysis of Straw - Research in Denmark.**  
Gitte Olsen, Poul Holst Pedersen, Ulrik Henriksen, Erik Kofoed.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference: "Pyrolysis and Gasification".  
Luxembourg. May 1989. 6 pages
  
- a-4) Research in Tarcracking and Applications of Tar.**  
Gitte Olsen  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference: "Pyrolysis and Gasification".  
Luxembourg. May 1989. pp. 479-485
  
- a-5) Pyrolyse og forgasning af halm. Delrapport 2.**  
**Pyrolysetjære fra halm som flydende brændstof.**  
Gitte Olsen, Søren Gabriel, Ulrik Henriksen, Thomas Koch, Erik Kofoed, Poul Holst Pedersen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 90-4. 50 pages. 1990.
  
- a-6) Gasification of Straw.**  
Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Søren Gabriel, Thomas Koch, Ole Christensen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference: "6th E. C. Conference. Biomass for Energy, Industry and Environment".  
Athens. Greece. April 1991. pp. 797 - 801.

- a-7) Pyrolyse og forgasning af halm. Delrapport 3. Varmetransport i halm.**  
 Erik Kofoed, Poul Holst Pedersen, Ole Christensen, Ulrik Henriksen, Søren Gabriel, Thomas Koch.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 91-4. 53 pages. 1991.
- a-8) Pyrolyse og forgasning af halm. Delrapport 4. Eksperimentel og beregningsmæssig undersøgelse af forhold ved pyrolyse og forgasning af halm.**  
 Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Ole Christensen, Søren Gabriel, Thomas Koch.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 91-3. 178 pages. 1991.
- a-9) Sensitivity Analysis of a Two Stage Biomass Gasifier by a Computer Based Model.**  
 Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Poster presentations at the conference "Advances in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Interlaken, Switzerland. May 1992. 12 pages (not published).
- a-10) Mass and Energy Distribution of the Pyrolysis Products from Straw.**  
 Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Advances in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Interlaken, Switzerland. May 1992. Vol. 2. pp. 1110 – 1121.
- a-11) Heat Transfer in Straw.**  
 Erik Kofoed, Ulrik Henriksen, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Advances in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Interlaken, Switzerland. May 1992. Vol. 2. pp. 966 – 976.
- a-12) Miljøeffekter ved forgasning af halm.**  
 Søren Gabriel, Erik Kofoed, Ulrik Henriksen, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 93-1. 85 pages. 1993.
- a-13) Forgasning af træflis.**  
 Ulrik Henriksen, Ole Christensen, Erik Kofoed.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 93-3. 27 pages. 1993.



- a-14) Anvendelse af gas fra halm som brændstof i gasmotorer.**  
Erik Kofoed, Ole Christensen, Ulrik Henriksen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 93-4. 18 pages. 1993.
- a-15) Termogravimetrisk analyse af halmkoks i trådkurv.**  
Sten Stoltze, Ulrik Henriksen, Ole Christensen, Torben Lyngbech.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 93-7. 38 pages. 1993.
- a-16) Gasification of Straw in a Large-Sample TGA.**  
Sten Stoltze, Ulrik Henriksen, Torben Lyngbech, Ole Christensen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference: "Nordic Seminar on Solid Fuel Reactivity".  
Gothenburg, Sweden. November 1993. 8 pages.
- a-17) Termogravimetrisk analyse af løs halmkoks.**  
Sten Stoltze, Ulrik Henriksen, Ole Christensen, Torben Lyngbech.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 94-1. 35 pages. 1994.
- a-18) Systematisering af termisk konvertering.**  
Peder Brandt, Ulrik Henriksen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 94-2. 103 pages. 1994.
- a-19) 50 kW-forgasseren.**  
Ulrik Henriksen, Ole Christensen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
RE 94-3. 137 pages. 1994.
- a-20) Gasification of Straw in a Large-Sample TGA. Part II. Further Studies Introducing Lower Steam Concentration, CO<sub>2</sub>-Gasification, and Gasification of Wood Chips.**  
Sten Stoltze, Ulrik Henriksen, Torben Lyngbech, Ole Christensen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference: "Nordic Seminar on Biomass Gasification and Combustion".  
Trondheim, Norway. June 1994. 10 pages.
- a-21) Systematization of Thermal Conversion.**  
Peder Brandt, Ulrik Henriksen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference: "Nordic Seminar on Biomass Gasification and Combustion".  
Trondheim, Norway. June 1994. 12 pages.

- a-22) Modelling a Straw Gasifier Using the SIL System.**  
 Niels Houbak, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "SIMS'94".  
 Stockholm, Sweden. August 1994. pp 288 - 290.
- a-23) Gasification of Straw in a Two-Stage 50 kW Gasifier.**  
 Ulrik Henriksen, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "8th European Biomass Conference.  
 Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry".  
 Vienna, Austria. October 1994. Vol. 2. pp. 1568 – 1578.
- a-24) Teoretisk og praktisk undersøgelse af varmetransporten i halmkoks.**  
 Lars Thaaning Pedersen, Stiig Bo Petersen, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 95-2. 142 pages. 1995.
- a-25) Reactivity of Straw by Steam Gasification in a Large-Sample TGA.**  
 Sten Stoltze, Ulrik Henriksen, Ole Christensen, Bjørn Qvale.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "8th European Biomass Conference.  
 Biomass for Energy, Environment Agriculture and Industry".  
 Vienna, Austria. October 1994. Vol. 3. pp. 1777 – 1783.
- a-26) Introduktion til slid i motorer.**  
 Jesper Schramm.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 94-7. 16 pages. 1994.
- a-27) Various Parameters Influencing Efficiency of and Emission from High Efficient Gas Engines.**  
 Jan de Wit, Dansk Gasteknisk Center a/s. Hørsholm.  
 Ole Christensen, Department of Energy Engineering. DTU.  
 In the proceedings of the conference "International Gas Research Conference 1995".  
 Cannes, France. November 1995. 10 pages.
- a-28) Effektivitet, miljøforhold og omkostninger ved biogasdrift af elproducerede gasmotoranlæg.**  
 Jan de Wit, Malene Nielsen, Dansk Gasteknisk Center a/s. Hørsholm.  
 Ole Christensen, Department of Energy Engineering. DTU.  
 1995.

- a-29) Two-Stage Fluid Bed Pyrolysis and Gasification Unit.**  
 Søren Houmøller, dk-TEKNIK, Søborg, Denmark  
 Martin W. Hansen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Nordic Seminar on Thermochemical Conversion of Solid Fuels".  
 NTNU. Trondheim, Norway. 13-14 December 1995. 14 pages.
- a-31) Theoretical and Experimental Investigation on Heat Transfer in Fixed Char Beds.**  
 Stiig Bo Petersen, Lars Thaaning Pedersen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Developments in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Banff, Canada. 20-24 May 1996. Vol. 2. pp. 851 – 863
- a-32) Relationship between Gasification Reactivity of Straw Char and Water Soluble Compounds present in this Materials.**  
 Ulrik Henriksen, Martin P. Jacobsen, Torben Lyngbech, Martin Wittrup Hansen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Developments in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Banff, Canada. 20-24 May 1996. Vol. 2. pp. 881 – 891.
- a-33) Co-Combustion of Biomass Pretreated in a Fluid Bed Pyrolysis Unit.**  
 Martin Wittrup Hansen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Søren Houmøller, dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 In proceedings of the conference: "Developments in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Banff, Canada. 20-24 May 1996. Vol. 1. pp. 267 – 281.
- a-34) Two-Stage Fluid Bed Pyrolysis and Gasification Unit.**  
 Søren Houmøller, dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 Martin Wittrup Hansen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "9th European Bioenergy Conference".  
 Copenhagen, Denmark. 24-27 June 1996. Vol. 2. pp. 1347–1352.
- a-35) Decomposition of Tar in Pyrolysis Gas by Partial Oxidation and Thermal Cracking.**  
 Peder Brandt, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "9th European Bioenergy Conference".  
 Copenhagen, Denmark. 24-27 June 1996. Vol. 2. pp. 1336-1340.

- a-36) Co-Combustion of Biomass Pretreated in a Fluid Bed Pyrolysis Unit.**  
 Martin Wittrup Hansen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Søren Houmøller, dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 In proceedings of the conference: "9th European Bioenergy Conference".  
 Copenhagen, Denmark. 24-27 June 1996. Vol. 2. pp. 1019-1026
- a-37) Co-Combustion of Biomass Pretreated in a Fluid Bed Pyrolysis Unit.**  
 Two-Stage Fluid Bed Pyrolysis and Gasification Unit.  
 Søren Houmøller. dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 Martin Wittrup Hansen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Nordic Seminar on Thermochemical  
 Conversion of Solid Fuels".  
 Trondheim. Norway. 4-5 December 1996. 16 pages.
- a-38) Preliminary Testing of "Standard Gasifier Fuel", SGF.**  
 Carsten Nielsen. dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 EU Project: JOR-CT95-0084.  
 Danish Energy Agency: 51161/95-0050.  
 9 pages. January 1997.
- a-39) Duration Test of "Standard Gasifier Fuel", SGF.**  
 Carsten Nielsen. dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 EU Project: JOR3-CT95-0084.  
 Danish Energy Agency: 51161/95-0050.  
 7 pages. January 1997.
- a-40) Gas som brændstof i stationære motorer.**  
 Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-97-01. 70 pages. 1997.
- a-41) Pyrolyse og forgasning af biomasse i en to-trins fluid bed forgasser.**  
 Martin Wittrup Fock, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Søren Houmøller. dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 ET-ES-97-02. 18 pages. 1997.
- a-42) Stationær model af Harbøre Forgasningsanlæg.**  
 Benny Gøbel.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-97-04. 39 pages. 1997.

- a-43) Tilsatsfyring med biomasse forbehandlet i en fluid bed pyrolyseenhed.**  
 Martin Wittrup Fock, Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 Søren Houmøller. dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 ET-ES-97-03. 190 pages. 1997.
- a-44) Samfyring med halm på kraftværker via forkoblede forgassere – oversigt, muligheder og anbefalinger.**  
 Peder Stoholm. DFBT Aps. Roskilde, Denmark.  
 Ulrik Henriksen, Martin Wittrup Fock.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-97-05. 160 pages. 1997.
- a-45) Straw -H<sub>2</sub>O Gasification Kinetics, Determination and Discussion.**  
 Lasse Holst Sørensen, Karin Tarp Poulsen. ReaTech. Roskilde. Denmark.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU. Denmark.  
 Håvar Risnes. Department of Thermal Energy and Hydropower. NTNU. Trondheim. Norway.  
 Lars K. Hansen. FLS Miljø a/s. Valby. Denmark.  
 Aksel Olsen, Ole Rathman. Risø National Laboratory. Roskilde. Denmark.  
 In proceedings of the conference: "Nordic Seminar on Thermochemical Conversion of Solid Fuels".  
 Gothenburg, Sweden. December 1997. 19 pages.
- a-46) Teoretiske betragtninger vedrørende termiske forhold i en makro TGA forsøgsreaktor.**  
 Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-98-05. 107 pages + 118 pages appendix. 1998.
- a-47) 400 kW tottrinsforgasningsanlægget i Aars.**  
 Jens Dall Bentzen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-98-06. 89 pages. 1998.
- a-48) Decomposition of Tar in Pyrolysis Gas by Partial Oxidation and Thermal Cracking. Part 2.**  
 Peder Brandt, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "10th European Conference and Technology Exhibition: Biomass for Energy and Industry".  
 Würzburg. Germany. 8.11. June 1998. pp. 1616-1618
- a-49) Tjærekrakning ved partiel oxidation af pyrolysegas fra halm. Delrapport 1. Forsøg ved 800 og 900°C.**  
 Peder Brandt, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-98-08. 52 pages. 1998.

- a-50) Biomassebaseret IFGT.**  
 Martin Wittrup Fock.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-98-10. 138 pages + 109 pages appendix. 1998.
- a-51) 100 kW tottrinsforgasningsanlæg på DTU. Resultater til og med foråret 1998.**  
 Jens Dall Bentzen, Peter Brandt, Benny Gøbel, Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-98-11. 106 pages. 1998.
- a-52) Motordrift på forgasningsgas fra DTU's tottrinsforgasser.**  
 Troels Pedersen, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-98-12. 60 pages. 1998.
- a-53) Trykfald over en bed af fliskoks.**  
 Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-99-01. 18 pages. 1999.
- a-54) Low Temperature CFB Gasifier - Conceptual Ideas and Applications.**  
 Peder Stoholm. DFBT. Roskilde.  
 Martin Wittrup Fock. dk-TEKNIK. Søborg, Denmark  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "15th International Conference on Fluid Bed Combustion". Savannah, Georgia. USA. May 1999. Paper No. FBC99-0176.  
 16 pages
- a-55) Investigations of a Two-Stage Gasifier.**  
 Jens Dall Bentzen. COWIconsult. Lyngby.  
 Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "2nd Olle Lindstrøm Symposium on Renewable Energy - Bioenergy".  
 Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden. June 1999. pp. 117-120.
- a-56) Optimering af 100 kW tottrinsforgasningsanlæg på DTU.**  
 Resultater fra forsøg i uge 37 1998.  
 Jens Dall Bentzen, Peder Brandt, Benny Gøbel, Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-99-02. 167 pages. 1999.

- a-57) Dynamic Modelling of the Two-Stage Gasification Process.**  
 Benny Gøbel, Ulrik Henriksen, Niels Houbak.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Jens Dall Bentzen. COWI consult. Lyngby.  
 In proceedings of the conference: "The 4th Biomass Conference of the Americas".  
 Oakland. California. USA. 29 August – 2nd September 1999. Vol. 2. pp. 1025-1031
- a-58) Ford VSG 411 Fuelled by Producer Gas from a Two-Stage Gasifier.**  
 Troels Pedersen, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm, Jesper Ahrenfeldt.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "The 3rd European Motor Biofuels Forum. International Conference & Trade Show".  
 Brussels, Belgium. 10-13 October 1999. 13 pages.
- a-59) Physical and Chemical Characterization of Particles in Producer Gas from Wood Chips.**  
 Claus Hindsgaul, Jesper Schramm, Linda Gratz, Ulrik Henriksen, Jens Dall Bentzen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Article in Bioresource Technology 73, Issue. 2, (2000). pp. 147-155.
- a-60) CFB-forgasser til biomasse og affald. Forsøg med halm i 50 kW LTCFB-anlæg.**  
 Peder Stoholm. DFBT Aps. Roskilde.  
 Rasmus Glar Nielsen, Henrik Nygaard, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-2000-01. 82 pages. 2000.
- a-61) CFB-forgasser til biomasse og affald. Slutrapport.**  
 Peder Stoholm. DFBT Aps. Roskilde.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-2000-02. 55 pages. 2000.
- a-62) Decomposition of Tar in Gas from Updraft Gasifier by Thermal Cracking.**  
 Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe. Denmark.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.
- a-63) Condensate from a Two-Stage Gasifier.**  
 Jens Dall Bentzen. COWIconsult. Lyngby.  
 Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul. Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.

- a-64) Optimized Two-Stage Gasifier.**  
 Jens Dall Bentzen. COWI consult. Lyngby.  
 Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul. Department of Energy Engineering. DTU.  
 Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.
- a-65) Evaluation of Gravimetric Tar Determinations on Particle Samples.**  
 Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 Jens Dall Bentzen. COWIconsult. Lyngby.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.
- a-66) Ford VSG 411 Fueled by Producer Gas from a Two-Stage Gasifier.**  
 Jesper Ahrenfeldt, Troels Pedersen, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.
- a-67) Medium and Large Scale Low Tar and High Efficient Gasification.**  
 Jens Dall Bentzen, Reto M. Hummelshøj. COWIconsult. Denmark.  
 Ulrik Henriksen, Brian Elmegaard. Department of Energy engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.
- a-68) Low Temperature CFB Gasifier Conceptual Ideas, Applications and First Test Results.**  
 Peder Stoholm. DFBT Aps. Roskilde, Denmark  
 R.G. Nielsen, Henrik Nygaard, Lasse Tobiasen, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Martin Wittrup Fock. dk-TEKNIK. Søborg, Denmark.  
 Kai Richardt. Rica-tec AS, Herlev, Denmark.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.
- a-69) High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier.**  
 Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.  
 Elfinnn Larsen. Risø National Laboratory. Roskilde. Denmark.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 Article in: "Energy and Fuels". Vol. 14, Issue 4. 2000. pp. 816-819.
- a-70) Eksperimentelle undersøgelser af motordrift på forgasningsgas.**  
 Jesper Ahrenfeldt, Troels Pedersen, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-2000-03. 30 pages. 2000.



- a-71) Low Temperature Particle Filtration of Producer Gas with Low Tar Content.**  
Claus Hindsgaul.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
ET-ES-2000-05. 30 pages. 2000
- a-72) The Pinch-method Applied on a Biomass Gasifier System.**  
Felicia Fock, Kirstine P. B. Thomsen, Niels Houbak, Ulrik Henriksen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference “ECOS 2000”,  
4-7 July 2000, Twente, Netherlands. pp. 1923-1932.
- a-73) Low Tar and High Efficient Gasification Concept.**  
Jens Dall Bentzen, Reto M. Hummelshøj. COWIconsult. Denmark  
Brian Elmegaard, Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference “ECOS 2000”,  
4-7 July 2000, Twente, Netherlands. 12 pages (Additional papers).
- a-74) Dynamic Modelling of char gasification in a fixed-bed.**  
Benny Gøbel, Ulrik Henriksen, Bjørn Qvale, Niels Houbak.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference “Progress in Thermochemical Biomass Conversion”,  
17-22 September 2000, Tyrol, Austria, 15 pages.
- a-75) Steam gasification of wood char and the effect of hydrogen inhibition on the chemical kinetics.**  
María Barrio. Department of Thermal Energy and Hydropower. NTNU.  
Norway  
Benny Gøbel. Department of Energy Engineering. DTU.  
Håvar Risnes. Department of Thermal Energy and Hydropower. NTNU.  
Norway.  
Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
Johan E. Hustad. Department of Thermal Energy and Hydropower. NTNU.  
Norway.  
Lasse Holst Sørensen. ReaTech. Roskilde. Denmark.  
In proceedings of the conference “Progress in Thermochemical Biomass Conversion”,  
17-22 September 2000, Tyrol, Austria
- a-76) Modelling a biomass gasification system by means of “EES”**  
Felicia Fock, Kirstine P. B. Thomsen, Niels Houbak, Ulrik Henriksen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
In proceedings of the conference “41<sup>st</sup> SIMS Simulation Conference”,  
18-19 September 2000, DTU, Denmark. pp. 179-185.

- a-77) An Evaluation of Char Reactivity and Ash Properties in Biomass Gasification Fundamental Processes in Biomass Gasification.**  
 Lasse Holst Sørensen, Jan Fjellerup. ReaTech. Roskilde. Denmark.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU. Denmark.  
 Antero Moilanen, Esa Kurkela, VTT, Finland.  
 Erik Winther. Energi E2 A/S, Ballerup, Denmark.  
 ReaTech, Denmark, 2000, 90+23 pages.
- a-78) Hydrocarbon Emissions from a SI Engine using Different Hydrogen Containing Gaseous Fuels**  
 Torben Kvist Jensen, Jesper Schramm, Carsten Søgaard, Jesper Ahrenfeldt  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
[SAE](#) paper 2000-01-2824, October 2000. 11 pages
- a-79) Eksperimentel on Wood Gas Engines.**  
 Jesper Ahrenfeldt, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-2000-04. 40 pages. 2000.
- a-80) Totrinsforgasning, uge 47 1999**  
**-Forsøgsforløb, kondensat, tryktab over koksbed.**  
 Jens Dall Bentzen, Peder Brandt, Claus Hindsgaul, Jesper Ahrenfeldt, Ulrik Henriksen, Felicia Fock, Benny Gøbel.  
 Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion, DTU.  
 MEK-ET-ES-2001-01. 56 pages. 2001.
- a-81) Tjæremåling på tottrinsforgasseren uge 47-1999**  
**-Afprøvning af SPA-metoden**  
 Peder brandt, Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul.  
 Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion, DTU.  
 MEK-ET-ES-2001-02. 9 pages . 2001
- a-82) Forenkledte betragtninger vedrørende tryktab og koksstruktur i fixed-bed forgasningsreaktorer.**  
 Ulrik Henriksen.  
 Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion, DTU.  
 MEK-ET-ES-2001-03. 33 pages. 2001.
- a-83) Analysis of UHC emission from a Natural Gas SI Engine Using Fast Response FID and a Heat Release model**  
 Torben Kvist Jensen, Jesper Schramm, Kazuyuki Narusawa and Shigeo Hori  
[SAE](#) paper 2001-01-3533, September 2001.
- a-84) Hydrocarbon Emission from Combustion of Mixtures of Natural Gas and Hydrogen Containing producer Gas in a SI Engine**  
 Torben Kvist Jensen, Jesper Schramm, Kazuyuki Narusawa and ShigeoHori  
[SAE](#) paper 2001-01-3532, September 2001.

- a-85) Open-cycle Indirectly Fired Gas Turbine for Wet Biomass Fuels.**  
 Brian Elmegaard, Bjørn Qvale, Giacinto Carapelli and Pietro de Faveri Tron  
 In proceedings of the conference "ECOS 2001", July 4-6 2001, Istanbul, Turkey. 7 pages.
- a-86) Experiments with Wood Gas Engines**  
 Department of Mechanical Engineering, DTU  
 Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm.  
 SAE-paper 2001-01-3681, September 2001.
- a-87) Static modelling and analysis of updraft gasifier for 35 kW<sub>el</sub> Stirling engine**  
 Department of Mechanical Engineering, DTU  
 Nina Jensen, Jesper Werling, Ulrik Henriksen, Henrik Carlsen  
 In proceedings of the conference: "10th International Stirling Engine Conference", Osnabrück, September 2001
- a-88) High Performance Gasification with the Two-stage Gasifier**  
 Benny Gøbel, Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Felicia Fock, Niels Houbak, Bjørn Quale (MEK, DTU) and Jens Dall Bentzen (COWI A/S)  
 Abstract in proceedings of cancelled conference "[Fifth Biomass Conference of the Americas](#)", September 2001.
- a-89) Modellering af strømningsforholdene i en koksbed vht. tyndfilmsmodeller**  
 Torben Kvist Jensen, Ulrik Henriksen og Benny Gøbel. MEK-ET-2002-03.  
 ISBN 87-7475-256-01.
- a-90) Videre undersøgelser af LavTemperatur Cirkulerende Fluid Bed forgasser (Slutrapport)**  
 M. W. Fock, N. Jensen, K. Richardt, P. Stoholm, U. Henriksen. EFP-2000, Ens. jr. nr. 1373/00-0033, MEK-ET-2002-02, ISBN 87-7475-255-03.
- a-91) Indirekte biomassefyret gasturbine**  
 Brian Elmegaard og Bjørn Qvale. MEK-ET-2002-01. 55 pages.
- a-92) Optimisation of Gasification Processes for Biomass/Straw By using Additives**  
 Lasse Holst Sørensen, Dorthe Posselt, Ulrik Henriksen, Entero Moilanen, Esa Kurkela, Per Stoltze, Per Rosenberg, Benny Gøbel, Poul Norby, Jan Fjellerup, Jens Dahl Bentzen, Håvar Risnes Maria Barrio, Johan E. Hustad and Erik Winther, OCIF Summary Report. ReaTech June 2002. ISBN 87-988105-1-0
- a-93) Analysis of Indirectly Fired Gas Turbine for Wet Biomass Fuels Based on commercial micro gas turbine data**  
 Brian Elmegaard and Bjørn Qvale. [ASME IGTI Turbo Expo 2002](#), Amsterdam, June 2002

- a-94) Thermodynamic Analysis of Supplementary-Fired Gas Turbine Cycles**  
Brian Elmegaard, Ulrik Henriksen and Bjørn Qvale. ECOS 2002. 8 pages.
- a-95) CHP from Updraft Gasifier and Stirling Engine**  
Nina Jensen, Jesper Werling, Henrik Carlsen og Ulrik Henriksen.  
Poster and paper V2.99 in proceedings of 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam June 2002, pp. 726-729.
- a-96) The Low Temperature CFB Gasifier --- Further Test Results and Possible Applications**  
Peder Stoholm, Rasmus Glar Nielsen, Lene Sarbæk, Lasse Tobiasen, Ulrik Henriksen, Martin Wittrup Fock, Kai Richardt, Bo Sander og Lars Wolff.  
Poster and paper V2.92 in proceedings of 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam June 2002, pp. 706-709
- a-97) Demonstration of the Vortex Process for Biomass Gasifiers**  
Felicia Fock, Ulrik Henriksen og Kristine Thomsen.  
Poster and paper V2.82 in proceedings of 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam June 2002, pp. 670-676.
- a-98) Straw Gasification in a Two-Stage Gasifier**  
Jens Dall Bentzen, Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen and Lasse Holst Sørensen.  
Poster and paper V2.40 in proceedings of 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam June 2002, pp. 577-580.
- a-99) Low Temperature Particle Filtration of Wood Gas with Low Tar Content**  
Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen and Jens Dall Bentzen.  
Poster and paper V2.11 in proceedings of 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam June 2002, pp. 494-497.
- a-100) High Performance Gasification with the Two-Stage Gasifier**  
Benny Gøbel, Jens Dall Bentzen, Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Felicia Fock, Niels Houbak og Bjørn Qvale.  
Oral presentation and paper O2.B1 in proceedings of 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam June 2002, pp. 389-395.

**a-101) Heat Transfer in a Fixed Biomass Char Bed**

Jan Fjellerup, Ulrik Henriksen, Peter Glarborg, Anker Jensen and Peter Arendt Jensen. December 2002. MEK-ET-2002-27. ISBN 87-7475-287-1.

**a-102) Calcium addition in straw gasification.**

Håvar Risnes (NTNU), Jan Fjellerup (ReaTech), Ulrik Henriksen (DTU, MEK), P. Norby (University of Oslo), K. Papadakis (ReaTech), D. Posselt (RUC) and Lasse Holst Sørensen (Reatech)  
Article in: [Fuel. Vol. 82, Issue 6, 2003. pp. 641-651.](#)

**a-103) Forgasning af halmpiller i Totrinsforgasser, 2001**

Jens Dall Bentzen, Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul, Jesper Ahrenfeldt, Benny Gøbel, Lasse Holst Sørensen. April 2003  
MEK-ET-ES-2003-02. ISBN 87-7475-295-2.

**a-104) Thermodynamic Analysis of Supplementary-Fired Gas Turbine Cycles.**

Brian Elmegaard, Ulrik Henriksen and Bjørn Qvale  
Article in: [International Journal of Applied Thermodynamics](#), Vol. 6, issue 2, 2003. pp. 85-92.

**a-105) The Role of Post Flame Oxidation on the UHC Emission for Combustion of Natural Gas and Hydrogen Containing Fuels**

Torben K. Jensen and Jesper Schramm.  
Oral Presentation and paper, JSAE/[SAE](#) Spring Fuels & Lubricants Meeting, Yokohama, Japan, June 2003. JSAE 20030294 SAE 2003-01-1775.

**a-106) Combustion Chamber Deposits and PAH Formation in SI Engines Fueled by Producer Gas from Biomass Gasification**

Jesper Ahrenfeldt, Ulrik Henriksen, Jesper Schramm, Torben K. Jensen and Helge Egsgaard.  
Oral Presentation and paper, JSAE/[SAE](#) Spring Fuels & Lubricants Meeting, Yokohama, Japan, June 2003. JSAE 20030328 SAE 2003-01-1770.

**a-107) Heat Transfer in a Fixed Bed of Straw Char**

Jan Fjellerup, Ulrik Henriksen, Anker Degn Jensen, Peter Arendt Jensen and Peter Glarborg  
Article in: [Energy & Fuels. Vol. 17, Issue 5, 2003. pp. 1251-1258.](#)

**a-108) The Design and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifier**

Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Benny Gøbel, Jens Dall Bentzen, Claus Hindsgaul and Lasse Holst Sørensen. In proceedings of 16th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS, Copenhagen, Juli 2003. The paper is selected and accepted for publication in special issue of "Energy".

- a-109) Modelling of Flow conditions in down draft gasifiers using thin film models**  
 Torben Kvist Jensen, Benny Gøbel and Ulrik Henriksen in proceedings of 16th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS, Copenhagen, July 2003
- a-110) The Low Temperature CFB Gasifier, Latest 50 kW Test Results and New 500 kW Test Plant**  
 Peder Stoholm, Rasmus Glar Nielsen, Matrin W. Fock, Nina Jensen, Bo Sander, Lars Wolff, Kai Richardt and Ulrik Henriksen in proceedings of 16th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS, Copenhagen, Juli 2003
- a-111) CO and PAH Emissions from Engines Operating on Biomass Producer Gas**  
 Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Ulrik Henriksen and Benny Gøbel  
 MEK-ET-2003-03. ISBN 87-7475-305-3. December 2003.
- a-112) Modellering af strømningsforhold og kanaldannelse I fixed bed koksbed**  
 Torben Kvist Jensen, Ulrik Henriksen, Benny Gøbel, DTU  
 Jens Dall Bentzen, Simon Matlok, Claus Borch, COWI  
 MEK-ET-2003-05. ISBN 87-7475-308-8. December 2003

**Referencegruppe b (Studenterrapporter udarbejdet i tilknytning til Biomasseforgasningsgruppen)**

- b-1) Avanceret fluid bed forgasning.**  
 Søren Houmøller, Martin Wittrup Hansen.  
 Supervisors: Ulrik Henriksen, Erik Kofoed.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Master Thesis. RE 95-4. 188 pages + 288 pages appendix. 1995.
- b-2) Dynamisk model af tottrinsforgasningsprocessen.**  
 Jens Dall Bentzen, Benny Gøbel.  
 Supervisors: Niels Houbak, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Master Thesis. PE 95-13. 134 pages + 126 pages appendix. 1995.
- b-3) Teoretisk og praktisk undersøgelse af varmetransporten i halmkoks.**  
 Lars Thaaning Pedersen, Stig Bo Petersen  
 Supervisors: Ulrik Henriksen, Erik kofoed.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Mid-way Project. 142 pages. 1995.
- b-4) Analyse af en pyrolyseenhed.**  
 Susanne Dahl , Lars Dyndgaard Fenger .  
 Supervisors: Bjørn Qvale, Niels Houbak & Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Master Thesis. ET-EP 96-32. 111 pages + 157 pages. 1996.
- b-5) Physical and Chemical Characterization of Particles in Producer Gas.**  
 Claus Hindsgaul.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Supervisors: Jesper Schramm, Ulrik Henriksen, Jens Dall Bentzen, Linda Gratz.  
 Master Thesis. Department of Mechanical Engineering - Eng. Mechanics.  
 Michigan Technological University ET-EP 98-01 138 pages + 109 pages appendix. 1998.
- b-6) Modellering af tottrinsforgasser.**  
 Felicia Fock, Kirstine Thomsen.  
 Supervisors: Ulrik Henriksen, Niels Houbak.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Preparatory Thesis. ET-EP-99-10A. 174 pages + 99 pages appendix. 1999.
- b-7) Optimering af koncepter for medstrømsforgasning.**  
 Felicia Fock, Kirstine Thomsen.  
 Supervisors: Niels Houbak, Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 Master Thesis. ET-EP-99-10B. 143 pages + 109 pages appendix. 2000.

- b-8) Modstrømsforgasning af halm.**  
Kjeld Nikolajsen.  
Supervisors: Bjørn Qvale, Ulrik Henriksen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
Master Thesis. ET-EP-2000-07. 61 pages + 4 appendices. 2000.
- b-9) Avanceret forgasning i Lav Temperatur Cirkulerende Fluid Bed anlæg**  
Lene Sarbæk, Lasse Tobiasen  
Supervisors: Ulrik Henriksen, Bjørn Qvale, Peder Stoholm, Martin Wittrup  
Fock. Master Thesis. MEK –EP-ET-2001-01. 153pages +185 pages apendix.  
Feb. 2001.
- b-10) Pyrolyse af træflis**  
Søren Thaaning Pedersen og Stig Møller Andersen  
Supervisors: Niels Houbak, Ulrik Henriksen  
Master Thesis, MEK-EP-ET-2001-04. 104 pages + 104 pages apendix. Maj  
2001.
- b-11) Forgasser til stirlingmotor**  
Nina Jensen og Jesper Werling  
Supervisors: Henrik Carlsen, Ulrik Henriksen  
Master Thesis, MEK-EP-ET-2001-05. 158 pages + 123 pages apendix. Maj  
2001.
- b-12) Tørring af flis.**  
Felicia Fock, Marius Kildsig.  
Supervisors: Ulrik Henriksen, Jesper Schramm, Erik Kofoed.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
Mid-way Project. ET-MP-96-03. 165 pages. June 1996.
- b-13) Pyrolyse af træflis ved recirkulering af pyrolysegas.**  
Torben Kvist Jensen, Peter Maigaard , Jesper Noes.  
Supervisors: Ulrik Henriksen, Erik Kofoed.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
Mid-way Project. ET-MP-96-05. 102 pages. 1996.
- b-14) Tørring af flis i transportsnegl.**  
Thorvald Uhrskov Ullum, Søren Thaaning Pedersen, Stig Møller Andersen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
Supervisors: Niels Houbak, Ulrik Henriksen, Jens Dall Bentzen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
Mid-way Project. ET-MP-98-01. 198 pages. 1998.
- b-15) Lavtemperatur cirkulerende fluid bed forgasning.**  
Henrik Nygaard, Lasse Tobiasen, Rasmus Glar Nielsen.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
Supervisors: Niels Houbak, Ulrik Henriksen, Bjørn Qvale.  
Department of Energy Engineering. DTU.  
Mid-way project. ET-MP-99-01. 99 pages + 181 pages appendix. 1999.



- b-16) Dynamisk modellering af forgasning i fixed koksbed**  
 Benny Gøbel.  
 Department of Energy Engineering, DTU.  
 Ph.d.- Thesis. ET-PHD-99-04. 174 pages + 210 pages appendix. 2000.
- b-17) Beskrivelse af reaktivitet og omsætning for koks af træ**  
 Henrik Hugger og Jens Kenneth Larsen.  
 Supervisor: Ulrik Henriksen og Niels Houbak  
 Mid-way project. MEK-ET-MP-2001-01. 35 pages. 2001. Mid-way project
- b-18) Koksomsætning i Lav Temperatur-Cirkulerende Fluid Bed anlæg**  
 Master Thesis by Rasmus Glar Nielsen. Supervisor: Bjørn Qvale.  
 Cosupervisors: Ulrik Henriksen and Peder Stoholm. May 2001. MEK-ET-EP-2002-05, 77 + 65 pages
- b-19) Konstruktion og afprøvning af hvirvelstrømsforgasser**  
 Master Thesis by Ejvind Larsen. Supervisor: Henrik Carlsen. Cosupervisor: Ulrik Henriksen. Marts 2002. MEK-ET-EP-2002-03. 81 + 69 pages. ,bilag
- b-20) Tørring af biomasse til brug i indirekte fyrede gasturbiner**  
 Forprojekt af Mette Lindal Madsen og Rikke Siv Svenningsen.
- b-21) Modellering af Low-Tar BIG processen**  
 Master Thesis by Lars Andersen. Supervisor: Bjørn Qvale. Cosupervisor: Brian Elmegaard. Marts 2002. MEK-ET-EP-2002-8.
- b-22) IFGT integreret med tørring og forbrænding af slam**  
 Master Thesis by Mette Lindal Madsen and Rikke Siv Sigvardsen. Supervisor: Bjørn Qvale. Cosupervisor: Brian Elmegaard. November 2002. MEK-ET-EP-2002-10.
- b-23) Comparative analysis of different solutions for use of combustible waste from food industry**  
 Master Thesis by Francesco Cherubini. Supervisor: Bjørn Qvale.  
 Cosupervisor: Brian Elmegaard. November 2002. MEK-ET-EP-2002-x.
- b-24) Intern pyrolyse med damp.**  
 Master Thesis by Morten Stender. Supervisor: Niels Houbak, Ulrik Henriksen.  
 Cosupervisor: Jens Dall Bentzen. MEK-ET-EP-2002-06.
- b-25) Verificering og optimering af totrinsforgassermode**  
 Polyteknisk midtvejsprojekt by : Henrik Laudal Iversen og Thomas Østergaard.. Supervisor: Ulrik Henriksen. Juni 2003. MEK.

**Referencegruppe c ( Andre referencer):**

- c-1)** Ravn Christina og Rousing Marianne. "Dannelse af sod I forgasningsprocesser". 1998. Eksamensprojekt, Institut for kemiteknik.
- c-2)** Evald, Anders. "Tungmetaller i aske fra anlæg fyret med halm og træ, hovedrapport". Dk-Teknik marts 1999.
- c-3)** Egsgaard, H, Larsen, E. "Termal transformation of light tar- Specific routs to aromatic aldehydes and PAH" in proceedings of 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain june 200.
- c-4)** Gaustad, Harald. "Varmetransport i halm før og under pyrolyse". Institut for termiske energi, NTU høsten 1993.
- c-5)** R. P. van der Lans, L. T. Pedersen, A. Jensen, P. Glarborg, K. Dam-Johansen. "Modelling and experiments of straw combustion in a grate furnace. Bio". Department of Chemical Engineering, Technical University of Denmark. 2000, Biomass & Bioenergy.
- c-6)** Stokes, D. "Pasteurs Quadrant. Basic Science and Technological Innovation". Brooking Institute Press Washington DC. 1997.
- c-7)** Reed, T.; Das, A "Handbook of Biomass Dawndraft Gasification Engine Systems. SERI/SP-271-3022: Solar Energy Research Institute Golden, CO 1988.
- c-8)** Susanto, H. Beenackers, A. A. C. M, van Swaaij, W. P. M "Moving bed gasifier with internal recycling of pyrolysis gas". In Producer Gas 1982. A collection of papers on producer gas with emphasis on application in developing countries. The Beijer Institute in Stockholm, Sweden 1983 99 316-334.
- c-9)** Lopamudra Devi, Krzysztof J. Ptasinski, Frans J.J.G.Janssen "A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes" Biomass & Bioenergy 24 (2003) pp.125-140.
- c-10)** Lettner Friedrich, Reetz Beate "Development of a staged Gasifier CHP-concept and quality Parameters" in proceedings of: 2<sup>nd</sup> World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rom, may 2004.

**Referencegruppe p (patenter)****p-1)**

WO200183645-A; WO200183645-A1; AU200152116-A

[Thermal gasification of solid fuel, e.g. biomass fuel, involves pyrolysis of fuel, and partial oxidation of volatile pyrolysis products](#)

UNIV DANMARKS TEKNISKE (UYDA-Non-standard)

**HENRIKSEN U**, FOCK F, THOMSEN K

**p-2)**

WO200168789-A; WO200168789-A1; DK200000417-A; ...

[Decomposition, gasification, and/or combustion of moist fuel or combustible organic or carbonaceous materials, e.g. biomass, involves addition of steam to thermal gasification process, e.g. pyrolysis stage](#)

COWI RADGIVENDE INGENIØRER AS (COWI-Non-standard)

BENTZEN J D, **HENRIKSEN U**, HUMMELSHOJ R M, et al.

**p-3)**

Patent number: EP1021499

Publication date: 2000-07-26

Inventor: STOHLM PEDER CHRISTIAN (DK)

Applicant: DANISH FLUID BED TECHNOLOGY AP (DK)

Classification:

- international: C10J3/56; F23C11/02

- european:

Application number: EP19980958839 19981209

Priority number(s): WO1998DK00541 19981209; DK19970001423 19971209

**p-4)**

WO200105911-A; EP1222240-A; WO200105911-A2; ...

[Reducing agglomeration, sintering and deposit formation from gasification or combustion of biomass material, e.g., straw, comprises addition of calculated amount of phosphorus and calcium](#)

REATECH (REAT-Non-standard); READDIT APS (READ-Non-standard)

SØRENSEN L H, FJELLERUP J, **HENRIKSEN U**

**p-5)**

WO200105913-A; WO200105913-A1; AU9948986-A; ...

[Improved method of combustion, gasification and pyrolysis of biomass for producing fertilizer comprises addition of a phosphorus component](#)

REATECH (REAT-Non-standard)

SØRENSEN L H, FJELLERUP J, **HENRIKSEN U**

## **Liste over bilag**

- \*\*\* Artikel i tidsskrift med "scientific review" af publikationen.
  - \*\* Artikel i conference-proceedings med "scientific review" af publikationen.
  - \* Artikel i conference-proceedings med "scientific review" af abstrakt.
- 
- 1) **Pyrolyse og forgasning af halm. Delrapport 4. Eksperimentel og beregningsmæssig undersøgelse af forhold ved pyrolyse og forgasning af halm.**  
 Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Ole Christensen, Søren Gabriel, Thomas Koch.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 91-3. 178 pages. 1991.
  
  - 2) **Mass and Energy Distribution of the Pyrolysis Products from Straw.**  
 \*\* Ulrik Henriksen, Erik Kofoed, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Advances in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Interlaken, Switzerland. May 1992. Vol. 2. pp. 1110 – 1121.
  
  - 3) **50 kW-forgasseren.**  
 Ulrik Henriksen, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 RE 94-3. 137 pages. 1994.
  
  - 4) **Gasification of Straw in a Two-Stage 50 kW Gasifier.**  
 \* Ulrik Henriksen, Ole Christensen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "8th European Biomass Conference. Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry".  
 Vienna, Austria. October 1994. Vol. 2. pp. 1568 – 1578.
  
  - 5) **Relationship between Gasification Reactivity of Straw Char and Water Soluble Compounds present in this Materials.**  
 \*\* Ulrik Henriksen, Martin P. Jacobsen, Torben Lyngbech, Martin Wittrup Hansen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 In proceedings of the conference: "Developments in Thermochemical Biomass Conversion".  
 Banff, Canada. 20-24 May 1996. Vol. 2. pp. 881 – 891.
  
  - 6) **Teoretiske betragtninger vedrørende termiske forhold i en makro TGA forsøgsreaktor.**  
 Ulrik Henriksen.  
 Department of Energy Engineering. DTU.  
 ET-ES-98-05. 107 pages + 118 pages appendix. 1998.

- 7) **Optimized Two-Stage Gasifier.**  
 \* Jens Dall Bentzen. COWI consult. Lyngby.  
 Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul. Department of Energy Engineering. DTU.  
 Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.  
 In proceedings of the conference: "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry".  
 Seville. Spain. June 2000.
  
- 8) **High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier.**  
 \*\*\* Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.  
 Elfinnn Larsen. Risø National Laboratory. Roskilde. Denmark.  
 Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.  
 Article in: "Energy and Fuels". Vol. 14, Issue 4. 2000. pp. 816-819.
  
- 9) **Forenklede betragtninger vedrørende tryktab og koksstruktur i fixed-bed forgasningsreaktorer.**  
 Ulrik Henriksen.  
 Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion, DTU.  
 MEK-ET-ES-2001-03. 33 pages. 2001.
  
- 10) **Heat Transfer in a Fixed Bed of Straw Char**  
 \*\*\* Jan Fjellerup, Ulrik Henriksen, Anker Degn Jensen, Peter Arendt Jensen and Peter Glarborg  
 Article in: [Energy & Fuels. Vol. 17, Issue 5, 2003. pp. 1251-1258.](#)
  
- 11) **The Design and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifier**  
 \*\* Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Benny Gøbel, Jens  
 \*\*\* Dall Bentzen, Claus Hindsgaul and Lasse Holst Sørensen. In proceedings of 16th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS, Copenhagen, Juli 2003.  
 The paper is selected and accepted for publication in special issue of "Energy".



**MEK-ET-PhD-2004-01**

**ISBN: 87-7475-321-5**